

固体音領域における建物応答の評価と  
躯体を利用した振動低減方法に関する研究

**Building Response Evaluation and Vibration Reduction  
Method Using Building Structures in Frequency Range  
Related to the Structure-Borne Sound**

2009年 2月

山岸 邦彰

固体音領域における建物応答の評価と  
躯体を利用した振動低減方法に関する研究

Building Response Evaluation and Vibration Reduction  
Method Using Building Structures in Frequency Range  
Related to the Structure-Borne Sound

2009年 2月

早稲田大学大学院 理工学研究科

山岸 邦彰

# 目次

|  |           |
|--|-----------|
| <b>第1章 序論</b>                          | <b>1</b>  |
| 1.1 本研究の背景と目的                          | 2         |
| 1.1.1 固体音の予測に関する背景と問題点                 | 2         |
| 1.1.2 固体音の低減対策に関する背景と問題点               | 4         |
| 1.1.3 本論文の目的                           | 6         |
| 1.2 既往の研究                              | 8         |
| 1.2.1 固体音領域における振動問題の体系                 | 8         |
| 1.2.2 基礎の入力損失特性に関する既往の研究               | 9         |
| 1.2.3 建物内の振動伝搬特性に関する既往の研究              | 10        |
| 1.2.4 固体音の低減対策に関する既往の研究                | 13        |
| 1.3 本論文の構成                             | 19        |
| 参考文献(第1章)                              | 21        |
| <br>                                   |           |
| <b>第2章 基礎の入力損失特性に関する簡易評価法の提案とその適用</b>  | <b>35</b> |
| 2.1 まえがき                               | 36        |
| 2.2 基礎の入力損失の簡易評価法の提案                   | 37        |
| 2.2.1 剛基礎を仮定した既往の入力損失の評価法              | 37        |
| 2.2.2 離散化された梁モデルによる柔基礎の入力損失の簡易評価法の提案   | 37        |
| 2.3 簡易評価法の各種パラメータに対する影響                | 42        |
| 2.3.1 解析モデル                            | 42        |
| 2.3.2 基礎板厚と基礎の入力損失との関係                 | 42        |
| 2.3.3 基礎幅と基礎の入力損失との関係                  | 43        |
| 2.3.4 基礎の分割数と基礎の入力損失との関係               | 44        |
| 2.3.5 入力変位の距離減衰と基礎の入力損失との関係            | 46        |
| 2.4 簡易評価法の実測結果への適用                     | 48        |
| 2.4.1 実測した建物と測定概要                      | 48        |
| 2.4.2 基礎に入力される地盤振動                     | 53        |
| 2.4.3 実測による伝達率の評価方法                    | 54        |
| 2.4.4 実測結果に対する慣性の相互作用効果および杭基礎の各影響の除去方法 | 54        |
| 2.4.5 剛基礎を仮定した入力損失の理論式と実測結果との比較        | 56        |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.4.6 簡易評価法と実測結果との比較とその適用性             | 59        |
| 2.5 剛基礎と柔基礎の入力損失の差異の定量的評価              | 62        |
| 2.6 結び                                 | 65        |
| 参考文献(第2章)                              | 66        |
| <b>第3章 建物内の振動伝搬特性に関する簡易評価法の提案とその適用</b> | <b>67</b> |
| 3.1 まえがき                               | 68        |
| 3.2 多質点系モデルを用いた上部構造の伝達関数の評価法の提案        | 69        |
| 3.2.1 計算の流れ                            | 69        |
| 3.2.2 多質点系モデルを用いた上部構造の伝達率の評価法          | 70        |
| (1) 上下振動部材の固有振動数および有効質量比の計算法           | 70        |
| (2) 上下振動部材の等価鉛直剛性の計算法                  | 73        |
| (3) 各階の質量および鉛直剛性の計算法                   | 73        |
| (4) 多質点系モデルの構築法                        | 74        |
| (5) 伝達率の計算法                            | 77        |
| 3.3 簡易評価法の実測結果への適用                     | 79        |
| 3.3.1 実測した建物と測定概要                      | 79        |
| 3.3.2 簡易評価法と実測結果との比較とその適用性             | 83        |
| 3.4 結び                                 | 90        |
| 参考文献(第3章)                              | 91        |
| <b>第4章 免震構法による固体音領域の振動低減特性の検討</b>      | <b>93</b> |
| 4.1 まえがき                               | 94        |
| 4.2 実測による免震建物の振動低減効果                   | 95        |
| 4.2.1 実測した建物と測定目的                      | 95        |
| 4.2.2 実測による各種振動伝搬特性                    | 95        |
| 4.3 免震建物の振動低減効果の解析的検討                  | 100       |
| 4.3.1 検討対象とした試設計建物の概要                  | 100       |
| 4.3.2 解析による振動低減効果および既往の研究結果との比較        | 103       |
| 4.4 結び                                 | 107       |
| 参考文献(第4章)                              | 108       |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第5章 スラブの振動を利用した固体音の低減対策工法の提案 | 111 |
| 5.1 まえがき                     | 112 |
| 5.2 TMD部材による低層建物の振動低減効果      | 113 |
| 5.2.1 解析対象建物の概要と解析パラメータ      | 113 |
| 5.2.2 低層建物の解析結果              | 116 |
| 5.3 TMD部材による高層建物の振動低減効果      | 145 |
| 5.3.1 解析対象建物の概要と解析パラメータ      | 145 |
| 5.3.2 高層建物の解析結果              | 147 |
| 5.4 結び                       | 159 |
| <br>                         |     |
| 第6章 結論                       | 161 |
| <br>                         |     |
| APPENDIX                     | 165 |
| A.1 スラブ振動の支配方程式と固有振動数の算定方法   | 166 |
| A.2 梁の形状関数                   | 178 |
| <br>                         |     |
| 発表論文・口頭発表論文一覧                | 185 |



# 第1章

## 序論

---

## 1.1 本研究の背景と目的

近年、高度な交通網が発達した市街地に集合住宅が建設されるケースが多くなってきている。このような市街地では、車両通過にともなう騒音、振動が住宅の居住性に影響を与える可能性が高い。特に、地下鉄の通過にともない居室内に発生する固体伝搬音（以下、固体音）は建物竣工後にクレームの対象となる場合が多い。また、固体音の問題は事後対策が困難なことから、建築の企画、設計段階での精度の高い予測および低減対策の立案が重要となる。都市の高度化や居住者の多様化が進む中で居住性の確保は重要な課題であり、固体音の予測およびその低減対策の必要性がますます高まっている。

以下では、固体音の予測とその低減対策に関する背景と現状の問題点について述べ、これらを踏まえた本研究の目的について述べる。

なお、固体音が問題となる振動数範囲を固体音領域と呼ぶことが多い。その振動数範囲についての明確な定義はないが、本研究では地下鉄振動で問題となる 30～60Hz 帯域を含む数 10Hz～100Hz 程度の振動数範囲を固体音領域と定義する。

### 1.1.1 固体音の予測に関する背景と問題点

固体音を予測するためには、加振源、地盤中の振動伝搬、地盤と建物との相互作用、建物内の振動伝搬、室内での音響放射の5つの特性を適切に評価する必要がある。既に多くの評価方法が研究され実用化されているが、残された課題も多い。以下では、これらの特性の評価に関する背景と問題点を挙げる。

加振源特性については、軌道、列車、高架橋、トンネル等の振動特性をそれぞれ評価する必要がある。加振源は狭義に捉えると列車から軌道に伝達される加振力を意味するが、本論文では列車による加振から、地盤に伝達される応力または変位の特性までをまとめて加振源特性と捉える。鉄道軌道から発生する固体音を制御することを目的として、井上ほか(1992)は加振力に関する実験的研究を行っている。また、吉岡ほか(1995)は新幹線の鉄道振動の発生モデルの提案を行っている。しかし、加振源特性を精度よく評価するためには、対象建物の近傍にある鉄道軌道の加振源特性を評価する必要がある。そのためには、当該軌道の加振源特性を調査する必要があり、調査に対する鉄道事業者や近隣住民の理解と協力が必要となるだけでなく、相当の調査費用が必要となる。特定の建築プロジェクトに対してこのような調査や評価を行うことは、時間的にも経済的にも困難である。

地盤中の振動伝搬特性については、局所的な地盤の不整形の影響を除けば振動レベルの距離減衰の問題として扱われることが多い。多くは地盤の減衰特性を幾何減衰と内部減衰とに分離して扱う Bronitz の回帰式がよく利用され(津野ほか(2005)), 実測から得られる距離減衰特性と Bronitz の回帰式とを比較している研究例は多い。しかし、Bronitz の回帰式を適用する場合には、幾何減



衰と内部減衰に係わるパラメータを設定する必要があるが、パラメータの設定方法には任意性が残る。半無限地盤または全無限地盤とみなせる理想地盤に近い状態における加振問題であれば Bronitz の回帰式を適用することができる。しかし、実際に存在する地盤のほとんどは成層地盤であり、実体波の重複反射の影響を考慮する必要があるだけでなく、地盤振動に対する実体波と表面波の寄与度が問題となる。Bronitz の回帰式を適用する場合には、これらの現象を考慮してパラメータを設定する必要があるなどその扱いが問題となる。

地盤と建物との相互作用に関する特性についてはこれまで多くの実測研究がある。また、これらの実測結果を説明するために、地盤、地下鉄トンネルおよび建物の基礎や上部構造をモデル化して有限要素法によるシミュレーション結果を提示している研究は比較的多い（例えば石橋ほか(2000)、藤井ほか(2000)など）。有限要素法は、計算条件を詳細に設定することができるため、高い精度でシミュレートすることができる手法であると考えられる。しかし、有限要素法を適用するためには多くの計算条件を必要とし、計算条件に関連する情報の収集に多くの調査と時間が必要である。また、固体音領域では 100Hz 程度までの振動数範囲を解析対象とするため要素数が多くなり、相当の計算時間が必要になる。さらに有限要素法は、利用者がモデル化に必要な要素分割や境界条件の設定などに関する特性や限界を熟知している必要があり、汎用性が高い方法であるとはいえない。一方、地盤と建物との相互作用に関する特性を、基礎における幾何学的相互作用による入力損失の特性として取り上げている研究も多い。特に、水平進行波を受ける埋め込みのない剛基礎に対する入力損失の理論式である山原(1969)の式（以下、山原式）がよく利用されている。この方法は本来、水平地震動に対する基礎の入力損失を評価する方法として考案されたものであり、上下振動や数 10Hz 以上の高振動数領域を対象としたものではない。しかし、山原式は少ないパラメータで構成された簡易な式であり、基礎の入力損失を容易に評価することができるため、交通振動の分野など地震動に関連する分野以外においても多く準用され、実用に供されている。しかし、基礎が剛体とみなせない柔基礎の場合に対して山原式を適用することは不適切である。長さ 60m を超える長大な基礎に対して、実測から計算した入力損失と山原式による入力損失を比較したところ、山原式では高振動数領域における入力損失を 20dB 以上過大に評価したとの報告もある（岩本ほか(2004)）。

建物内の振動伝搬特性については、松田ほか(1979)がエネルギーの幾何学的拡散による減衰と内部粘性等による減衰を考慮した距離減衰式を導入して、実測結果に基づいた回帰式を導いている。また、要素間のエネルギーの平衡状態を解析して音圧レベルを推定する SEA (Statistical Energy Analysis) 法（入江(1992)）や、同法を発展させて鉄筋コンクリート構造物など減衰が大きい構造物に対して開発された拡張 SEA 法（峯村ほか(1994)）等が提案されている。これらの方法は複雑な構造をした建物に対しても適用できる利点がある。しかし、建物内で発生する振動の反射、拡散を現象的に捉えたものではないため、建物の振動モードの影響が強く現れる低振動数領域で評価する場合には注意する必要がある。また、このような建物内の上下振動の重複反射を評

価することのできる方法に縄岡ほか(1992)の方法がある。この方法は、建物を模擬した質点とバネを直列に配置した多質点系モデルにより各質点の応答を計算し、次にこれらの応答を入力とするスラブの応答を有限要素法により計算し、最後にスラブの応答結果を用いて室内の音圧レベルを予測する方法である。実測値との整合性は高いが、解析の一部に有限要素法を利用するなど、簡易な方法であるとはいえない。建築企画段階では評価に関わる時間が制限されていることが多く、評価方法の簡易性も重要な要件であると考えられる。

音響放射特性については、小林ほか(2001)が音響エネルギー密度と拡散音場における音響エネルギーの関係から展開した予測式を立て、直方体をした実験住宅に対する各種係数を算出している。ただし、実際の建物で予測する場合にこれらの係数の適用性や、音圧の空間モードの影響などが問題となる。

以上のように、固体音を予測するためには加振源から室内での音響放射に関わる種々の振動特性を評価する必要がある。そして、これらの特性を評価するための既往の評価方法も多く存在する。しかし、これらの評価方法の中には実用上の観点から多くの課題が残されているものもある。これらの課題に対して共通するものであり、解決を図らなければならない主たる課題は、評価精度の確保と評価時間の短縮との両立である。一般的に、評価精度を上げるためには計算条件を詳細に設定して多くの演算を要するために、評価時間が長くなる。一方、既往の評価式を適用することにより評価時間を短縮させることは可能であるが、対象建物が評価式の適用条件を満足しない場合には評価精度が低下する。固体音の予測結果は、その後の建築計画に大きな影響を与えるため、時間が限られている建築企画の段階においても、精度良く、かつ短時間で予測する必要がある。そのためには、建物の実況に適応した簡易なモデルによる応答評価手法を確立する必要がある。

#### 1.1.2 固体音の低減対策に関する背景と問題点

固体音の予測の結果、居住性に対して著しい影響が生じると予想される場合には、加振源から建物に至る経路の適所で固体音の低減対策を講じる必要がある（例えば吉岡(1999)）。

これまでに固体音の低減対策についても種々考案され、実用化されてきている。しかし、これらの低減対策を適用する場合に、対象建物および地盤の特徴や条件に起因する様々な制約を考慮する必要がある。加振源の低減対策は鉄道事業者等が実施するものであり、建築主または設計者、施工者が低減対策を実施することは困難である。また、地盤における低減対策も敷地内で実施する必要があるという制約がある。そのため、低減対策に必要な余地がない場合には、建築計画の見直しも考える必要がある。

他方、建物における低減対策は建築主の裁量で実施できる利点がある。対策のできる部位は建物基礎・躯体、内・外装に限られるが、これらの部位における低減対策の中で多く利用されているものは建物基礎における対策と内装における対策である。

建物基礎における低減対策は、基礎底面および側面に防振シートなどの防振材料を設置する方法であり、適用例も多く一般化している。しかし、それらの低減対策による効果について、試験的に作成した小規模な基礎に対する低減対策効果を測定した研究があるものの（藤井ほか(2000)）、多くの研究では低減対策を実施した実在建物での測定値と設計時に行った予測値との比較により低減対策効果を推定しているに過ぎない。また、これらの低減対策の仕様は単純な理論式により決定されているものが多く、実在建物に対する理論式の適用性についてはほとんど検討されていないといっても過言でない。低減対策の効果は本来、基礎形状、基礎形式、地盤などの条件が強く影響すると考えられるため、これらの条件を取り入れた仕様の決定方法の確立が課題である。

また、内装における低減対策として多く適用されているものに浮き構造がある。浮き構造とは躯体で構成された室内に、防振材や緩衝材を介した空間を構築して、躯体から伝達される固体音の低減を図る工法である。会議場など、建物内の一部の空間（居室）に対して適用されることが多い。しかし、集合住宅に対して適用する場合には、対策範囲が広く適用数が多いこと、居室空間が狭まること、建築費用が増大すること、などの問題が生じる。

以上述べたように、多くの低減対策は新たにデバイスを付加するものが多いため、建築費が高くなるだけでなく、一部の居室等にデバイスを設置する必要があるために建物の使用が一部で制限される場合がある。そのため、固体音の低減対策として今後は経済性と使用性を満足する対策が望まれる。

そのような低減対策の一候補として免震構法がある。免震構法は大地震時における建物の安全性を高めるために開発された構法であるが、副次的に固体音を低減する効果があるとの報告がある（例えば阿部ほか(1994)）。しかし、免震構法の振動低減効果についてはまだ定量的に明らかにされていない。免震構法で多用される積層ゴムのゴム材料が鉄筋コンクリートに比べて Young 率が低いことから、積層ゴムを防振ゴムとして扱い、上部構造を剛体とみなした 1 質点系モデルの応答曲線を用いて振動低減効果を評価する例が多い。しかし、一般的な積層ゴムの鉛直剛性は鉄筋コンクリート柱の鉛直剛性と比較して低くないため、建物によっては防振ゴムのような顕著な防振効果を期待できないと予想される。以上より、免震構法を固体音の低減対策の一工法として採用する場合には、免震部材が固体音の低減に寄与する条件を整理し、振動低減効果を定量的に評価できることが必要である。

また、免震構法以外にも経済性と使用性を満足する固体音の低減対策として、スラブの振動を利用した対策工法も一候補として挙げられる。この工法はスラブの振動により、その固有振動数付近で建物応答が低減する性質を利用して、固体音を低減させる方法である。固体音は主に躯体や仕上げ材の上下振動によって励起されるため、上下振動が卓越しやすいスラブ、廊下、バルコニーなどを利用して建物の上下振動を低減させることにより、固体音が低減される可能性がある。しかし、このような低減対策方法に関する既往の研究は確認されない。建物応答の低減を目的として設置されるこのようなスラブは一種の動吸振器（TMD [Tuned Mass Damper の略]）と考えら

れるため、本論文ではこのような特徴を有するスラブを TMD 部材と略称することにする。

一般的に存在する TMD は、構造物の頂部に振り子または剛性要素を介して付加質量を取り付け、これらの共振現象を利用して構造物の振動を抑制するものである。TMD は、タワーや斜張橋の主塔などの長周期構造物の風揺れ対策や、地震の主要動の後に生じる後揺れ対策として、既に多く適用されているが、固体音の低減対策として利用されている例は、細野ほか(1987)が地下鉄に起因する固体音を低減させる目的で、事務室の床下のドライエリアを利用して TMD を設置しているほかは、ほとんど見られない。このように TMD を建物内に設置する場合、建物の利用に支障が生じるなどの理由により設置可能な場所が限られているだけでなく、設置のための新たな費用が発生する。また、質量を付加することにもなう長期応力や建物に対する慣性力の増大など、新たな問題も生じる。一方、前段落で定義した TMD 部材は新たなデバイスの設置を必要とせず、建物の成立上必要なものとして既に計画された部材を利用するため、TMD の設置場所を確保する問題や、質量増大にもなう地震力の増大の問題が解決するものと期待される。

このように、経済性と使用性を満足する固体音の低減対策として、免震構法やスラブなど躯体を利用した対策工法が注目される。

### 1.1.3 本論文の目的

以上、固体音の予測および低減対策に関する背景と問題点を踏まえ、これらの問題点を解決するために、以下の技術的課題の解決を図ることが重要であると考えられる。

固体音の予測に関する技術的課題として、

- (1) 基礎の入力損失を簡易に評価すること
- (2) 建物の振動伝搬特性を簡易に評価すること

固体音の低減対策に関する技術的課題として、

- (3) 免震構法による固体音領域の振動低減の特性を把握すること
- (4) スラブを利用した TMD 部材を提案し、その効果を検証すること

固体音を予測するためには、加振源、地盤中の振動伝搬、地盤と建物との相互作用、建物内の振動伝搬、室内での音響放射の各特性を評価することが必要であることは既に述べた。これらの特性の中で、加振源と地盤中の振動伝搬に関する特性については、実測をともなうものの、着工前の更地における地盤振動を測定することにより、両特性が合積された実際の振動特性を把握することができる。また、室内での音響放射特性については、スラブの振動特性を把握することができれば、これまでの測定結果を参照することにより、予測することが可能である。したがって、固体音を予測するためには、地盤と建物との相互作用、建物内の振動伝搬の各特性を適切に評価することが特に重要になる。両特性の評価精度の向上を図るためには、現時点では有限要素法の

適用が不可欠である。しかし、詳細な情報が少ない建築企画段階で有限要素法による評価を実施することは得策ではない。そのため、限られた時間でこれらの特性を簡易に評価することのできる手法の確立が重要であると考えられる。

他方、固体音の低減対策を選定する上で、付加的にデバイスを設置する対策の場合は使用性と経済性に影響することから、両者の性質を満足するような対策が存在することが望ましい。前項で示したように、今後期待される対策例に共通することは建物の躯体を利用している点である。本論文は躯体を利用した固体音の低減対策に着目して、使用性と経済性に優れた対策工法を提案し、対策の選択肢を増やすことを目的とする。中でも、免震構法と TMD 部材を適用する対策工法が最も有力な候補として挙げられる。

以上より、本論文は(1)～(4)に掲げた技術的課題の解決を図ることを目的とする。

## 1.2 既往の研究

### 1.2.1 固体音領域における振動問題の体系

固体音に関する既往の研究は、固体音の予測に関する研究と固体音の低減対策に関する研究とに分類される。なお、ここでいう問題とは音、振動などの物理的側面を対象にした問題を指し、固体音の官能にともなう問題や、訴訟などの社会的問題については省略する。

また、固体音の予測については、加振源、地盤中の振動伝搬、地盤と建物との相互作用、建物内の振動伝搬、室内での音響放射等の各特性に関する研究に分かれる。固体音の低減対策については、加振源、地盤、建物基礎・躯体、内装の各部位における対策に関する研究に分かれる。

図 1.1に固体音領域における振動問題の体系を示す。

本節では、特に本研究との関連性が高い、基礎の入力損失特性（地盤と建物との相互作用特性）、建物内の振動伝搬特性、および固体音の低減対策に関する既往の研究について述べる。

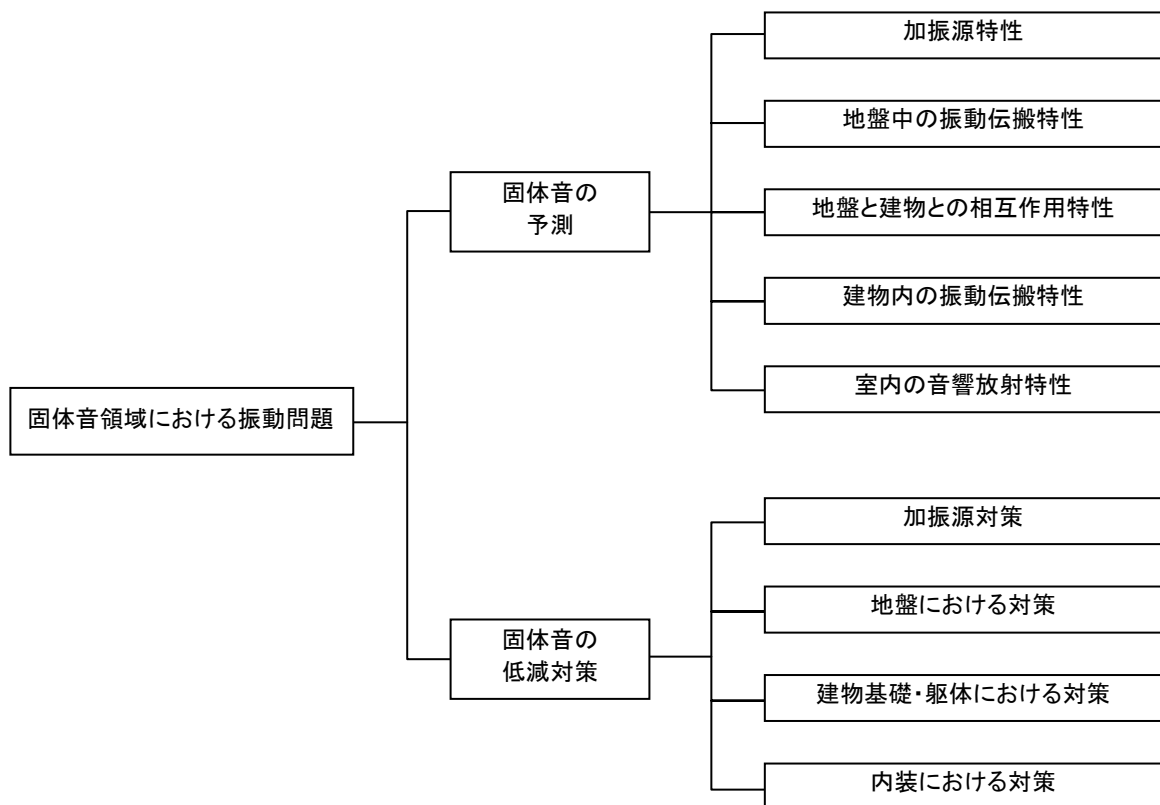


図 1.1 固体音領域における振動問題の体系

## 1.2.2 基礎の入力損失特性に関する既往の研究

加振源から地盤を伝搬してきた地盤振動が建物基礎に入力されるときに、基礎はそれ自体が周辺地盤を拘束することにより生じる幾何学的な相互作用の効果と、建物に生じた振動が周辺地盤に逸散することにより生じる動力学的な相互作用の効果の影響を受ける。前者は入力との相互作用または基礎の入力損失、後者は慣性の相互作用とも呼ばれる（日本建築学会(1996)）。固体音領域では地盤中を伝搬する地盤振動の波長が基礎長さと比較して短いため、基礎の入力損失の影響が強くなると考えられる。本項では本研究と関連性の高い基礎の入力損失に関する既往の研究を中心に述べる。

前述したように国内において基礎の入力損失の評価によく利用されるものとして山原式（山原(1969)）がある。山原(1969)は水平進行波の波動場において、地表面に設置された埋め込みのない剛基礎がその接する地盤を完全に拘束するという仮定の基で基礎の入力損失の理論式を確立した。なお、入力損失という技術用語は山原によって名付けられている。元来は水平地震動を対象として構築されたものであるが、波動場が水平進行波であり、基礎が埋め込みのない剛基礎である場合には、交通振動など他の地盤振動に対しても適用が可能であると考えられる。山原・塩谷(1978)は1971年 San Fernando 地震における強震記録から得られる伝達率と、理論式で計算された基礎の入力損失特性および動的相互作用の伝達特性の両者を考慮した伝達率との比較を行っている（正確には山原(1969)と同等な山原(1970)のフィルターを使用している）。また、山原(1969)と同一の式が Ray et al.(1978)によっても導かれている。Luco(1969)は等方均質半無限地盤上にある剛基礎を有するせん断壁モデルの入力損失と動的相互作用の各効果に関する理論式を展開している。これらの入力損失に関する理論式は地震動の1方向到来を考えているが、Matsushima(1975)は実際の地震動は不確定性を有していると考え、不確定性を考慮した入力損失フィルターを提案している。

その後、基礎の入力損失に関する研究は多く見られなくなったが、原子力発電所の合理的な設計法の開発を目的として基礎の入力損失に関する研究が増えてきた。竹内ほか(1984)は相互作用の影響を Dynamic Ground Compliance 理論による1質点-基礎連成系の伝達特性と入力損失フィルターの伝達特性との積で評価している。また最近では、地震動と常時微動による中低層建物の基礎の入力損失効果に関する研究として小島ほか(2005)、地震動による低層建物の基礎の入力損失に関する研究として安達ほか(2006)があるなど、基礎の入力損失に関する研究は現在まで続いている。

以上は地震動や常時微動に関する地盤と建物との相互作用の研究が主であるが、交通振動や固体音の予測を目的とした基礎の入力損失に関する実測研究も数多く行われている。小堺ほか(1989)は交通振動を対象として加振深さ、付加質量、基礎底板の厚さをパラメータとした基礎の入力損失に関する実験を行っている。大川ほか(1991)は地下、地上、高架の各軌道に隣接する10建物を対象として基礎の入力損失の測定結果を示しているが、その特性は複雑であり一定の傾向

を確認するに至っていないと報告している。他にも地下鉄軌道を対象としたものに、吉原ほか(1990)、石崎ほか(1993)、平野・縄岡(1996)、中澤ほか(1998)、濱口ほか(1999)、森下ほか(2004)、山岸ほか(2005)、山岸ほか(2006)、野中ほか(2006)、岩本ほか(2007)、地上軌道を対象としたものに、小西ほか(1996)、小林・塩田(1997)、柴田ほか(1999)、棚瀬ほか(1999)、山川ほか(1999)、石橋ほか(2000)、野口ほか(2002)、高架軌道を対象としたものに、小塚ほか(1991)、岩本ほか(2004)がある。

これらの既往の研究は、実測結果を前述した理論解（その多くは山原(1969)）と比較しているものが多い（吉原ほか(1990)、内田(2002)、野中ほか(2006)）。山原式は、埋め込みが浅く高い剛性を有する構造物や、比較的小規模の基礎に対して適用することが可能である。しかし、長大な基礎に対しては基礎の柔性が問題となるため、山原式の適用に問題が生じる。一方、柔基礎に対する入力損失の評価方法に関する既往の研究は少ない。齊藤ほか(2003)は橋梁や高架橋の大型基礎（基礎長径比が2以上）に対して曲げ柔性を考慮した理論解を提案している。森清ほか(2006)は基礎の辺長比や剛性の影響を考慮した等価な基礎長さの概念を導入して、SH波の斜め入射による基礎の水平動の伝達関数を評価する井口(1973)の理論式を準用した評価式を提案している。しかし、森清ほかの評価式はパラメータの設定に任意性があることや、評価式が常時微動測定に基づき構築されており振動の入力機構に不明な点があることなど、この評価式の適用にあたっては留意点も多い。また、これらの評価式は30Hz程度以下の振動数範囲における検討結果である。固体音領域における入力損失の評価方法に関する研究は山岸ほか(2007)以外にはほとんど見られない。

基礎の入力損失効果の検証として、有限要素法によるシミュレーション結果と比較している研究例が多い。有限要素法による解析モデルの多くは、計算領域を鉄道軌道に直交する2次元の断面とし、底面を粘性境界、側面をエネルギー伝達境界または粘性境界としたメッシュ地盤が構築され、地盤内または地表面に加振点が設置され、ビーム要素により建物架構が構築されたモデルである（例えば、藤井ほか(1999)、堀越ほか(1999)、藤井ほか(2000)、山田ほか(2005)、藤井ほか(2006)、吉田(2007)）。また、建物が杭基礎の場合にはビーム要素により杭がモデル化されている場合が多い。有限要素法は、地盤を伝搬する地盤振動の波長によってメッシュサイズが決定されるが、多くの研究では最大振動数を約100Hzとしているため、20cm×20cm程度の非常に細かいメッシュサイズとなっているものが多い。

### 1.2.3 建物内の振動伝搬特性に関する既往の研究

建物基礎に入力された振動は、躯体や非構造体を介して伝搬し、建物各部位の振動に変換される。これらの振動が室内の空気を振動させ、固体音となって人の耳に到達する。固体音の予測精度を向上させるためには、これらの建物内の振動伝搬を適切に評価することが重要となる。実存する建物は躯体、仕上げ、設備、その他の非構造材等が結合した複雑な形態となり、これらの部



位の振動を適切に評価することは容易ではない。そこで、精度を確保しつつ評価の簡略性を高めることが重要である。建物内の振動伝搬特性について既往の研究を分類すると、実験式による方法、統計的エネルギー法、波動理論による方法、多質点系モデルによる方法、有限要素法、の5方法に分類されることが多い（例えば、藤原(1994)、田中(1996)、縄岡(1997)）。

以下では、これらの方法に関する既往の研究について述べる。

### (1) 実験式による方法

実験式による方法は、建物全体の振動をマクロ的に捉え、実存する建物における実測結果および模型実験等から導出された振動加速度レベル等に対する回帰式を利用する方法である。先駆であり、またその後の多くの研究者に適用されている方法に松田ほか(1979)の方法がある。松田ほか(1979)の方法は、点加振に対する建物内の固体音の幾何学的拡散による減衰特性と粘性による減衰特性をそれぞれ評価する式で構成された予測式を利用する方法である。この方法は地下鉄、駅建物等を対象として数多くの研究および実例に適用されている。地下鉄振動を対象として、古宇田ほか(1979)、坂本ほか(1989)、羽染ほか(1989)、大川ほか(1991)、小堺ほか(1992, 1993)、須賀ほか(1994a, 1994b)、平松(2007a)、駅建物(駅ビル)を対象として、林田ほか(1996)、藤井ほか(1997)、大スパン鉄骨構造建物を対象として、漆戸ほか(1991)がある。また、蓮田ほか(1994)は松田ほか(1979)の方法を多点入力の場合に応用し、実測結果との比較を行っている。蓮田ほか(1994)の方法を適用した例として、山下ほか(1998)がある。これらの実験式や予測式は幾何減衰と粘性減衰の各項が明確に分離されているが、幾何減衰と内部減衰に関係する係数の設定に任意性が残ることや、地下鉄振動等で問題となる数10~100Hz付近の上下方向の低次振動モードの影響が大きい振動数領域では単純な幾何減衰が成立しない等の問題も残されている。

### (2) 統計的エネルギー法

統計的エネルギー法 (Statistical Energy Analysis または SEA 法) は、Lyon(1975)によって提案され、構造部材と音響空間とが連結したシステムにおいて振動伝達を予測する方法であり、航空宇宙、自動車、船舶など幅広い分野で利用されている。この方法は、対象となるシステムがランダム振動の拡散された定常状態の場合を考え、(1)要素内の減衰は要素の持つエネルギーに比例する、(2)要素間のエネルギーは高い方から低い方へ流れ、それらは要素間のエネルギー差に比例する、という2つの仮定のもと、内部損失係数と結合損失係数を求め、パワーの釣合いに関する連立方程式を解く方法である。Fujiwara et al.(1983)は、病院建物を利用して、改修時のはつり振動を加振源として固体音伝搬性状を実測し、統計的エネルギー法による数値計算結果と比較している。統計的エネルギー法は構造物を構成する要素間の結合が弱いこと、要素内の減衰が小さいことが前提であるが、峯村ほか(1994)はコンクリート系の構造物に応用することのできる拡張 SEA 法を提案して実測との比較を行っている。ただし、これらの方法は振動現象を模擬したものではない

ため、建物全体の振動モードが影響する 50Hz 程度以下の振動数領域では適用が難しいと考えられる。

また、Zeman & Bogdanoff(1969)は SEA 法が音響学をベースとした統計的なアプローチによる方法であるのに対して、振動学をベースとしたランダム振動を受ける構造物のパワーの流れを定式化し、SEA 法をより一般化させている。

### (3) 波動理論による方法

波動理論による方法は、梁もしくは平板の交差部について変位および傾きの連続条件式、力およびモーメントの釣合い条件式から、交差部における波動の透過、反射率を求め、振動加速度レベルを計算する方法である (Cremer & Heckl(1988), 縄岡(1997))。Cremer & Heckl(1988)は直交交差部における反射率、透過率の解析例を提示しているが、このような直交交差部における基礎的研究は、藤原(1981), 田中(1981)などによって行われている。一方、田中ほか(1988)は骨組みモデルの模型実験を行い、直交交差部の反射率と透過率をパラメータとして、波動の形態変化と多重反射を用いた応答計算の結果と比較を行っている。また、縄岡(1997)は建物を梁と平板の集合体として、エネルギー平衡条件を満足する擬似縦波、曲げ波、せん断波およびねじれ波に関する Lagrange の運動方程式を導出している。

### (4) 多質点系モデルによる方法

多質点系モデルによる方法は、建物を適当な質点とバネから成るモデルに置換し、そのモデルによって導かれる運動方程式から各地点の伝達関数や応答を計算する方法である。藤井ほか(1998)は免震構法を採用した 6 階建ての建物に対して 1 フロアを 1 質点とした多質点系モデルを構築して振動解析を行っている。このとき、減衰定数を全次数に対して 20%とした場合に実測結果との整合性がとれたと報告している。谷垣ほか(2004)も免震構法を採用した 20 階建ての建物に対して 1 フロアを 1 質点とした多質点系モデルによる伝達関数を計算しているが、減衰定数は 5~10%程度で実測結果と整合すると報告している。武井ほか(1997)はスラブ振動を無視できないとして、1 フロアに 1 個のスラブ振動系を設定した多質点系モデルを構築して加速度応答を計算している。減衰マトリクスは剛性比例型で 1 次モードに対して 5%の減衰定数を設定している。山岸ほか(2006), 原田ほか(2007)は 1 フロアに 2 個のスラブ振動系を設定した多質点系モデルを構築して伝達関数を計算している。これらの研究では解析結果と実測結果が整合している部分もあるが、想定している減衰定数のばらつきが大きい。固体音領域における減衰定数の推定は建物内の振動伝搬特性を評価する上で重要な課題である。

また、梁とスラブを除く躯体の振動を多質点系モデルにより評価し、梁とスラブの振動を有限要素法により評価する方法もあるがこの方法については 1.1.2 項で述べた (縄岡ほか(1992))。この方法を適用したものに平野・縄岡(1996)がある。

## (5) 有限要素法による方法

有限要素法は複雑な建物形状に適合させることができ、振動予測や実測結果のシミュレーションを実施するために多く適用されている。建物内の振動伝搬だけでなく、地盤および基礎をモデル化することにより、基礎の入力損失と動的相互作用の各効果を同時に評価することができる。既往の研究の多くが2次元場の解析であり、建物を集中質点とビーム要素で構成されたモデルとし、地盤を平面ひずみ要素やソリッド要素を用いた例は多い（例えば、渡辺ほか(1995)、藤井ほか(1996)、武居ほか(1997)、川久保ほか(1999)、藤井ほか(1999)、藤井ほか(2006)）。また、建物のみのモデル化では3次元モデルが使用されることがあるが（例えば、安藤ほか(1998)、二宮ほか(1998)、石橋ほか(2002)）、固体音領域において地盤と建物を3次元モデルに置き換え評価した例は確認されない。

### 1.2.4 固体音の低減対策に関する既往の研究

固体音は加振源となる車両から音響放射される居室に至るまで様々な部位が関係するため、伝搬経路の各所で対策を行うことができる。しかし、対策工法によっては事前に実施する必要があるものや、鉄道事業者の協力が必要なものなど、様々な条件や制約がある。また、対策の前後による振動低減効果の定量的な評価も重要である。本項では、加振源、地盤、建物基礎・躯体、内装における振動対策に関する既往の研究について述べる。

#### (1) 加振源対策

ここでは、1.1.1項で述べたように加振源を列車による加振から地盤に応力または変位が伝達されるまでの各振動要素と考える。まず、車両自体の振動および車両の移動にともない振動が発生する。次に、これらの振動がレールに伝達され、地上軌道の場合にはその振動が枕木やバラスト軌道を介して地盤に伝達され、高架軌道や地下軌道の場合にはこれらのスラブ軌道や橋脚、トンネルなどの構築物を介して、振動が地盤に伝達される。以上のような振動の伝達機構の特性を考慮して、振動部位である車両、軌道、構築物の振動低減対策に関する研究および工法開発が多く実施されている。本項では吉岡(1999)を参考に加振源対策の既往の研究について述べる。

##### (1-a) 車両における低減対策

車両の振動が固体音に関連する一連の振動の根源である。車両における低減対策として、車両の振動レベルを小さくすること、卓越振動数を移動させること、などが考えられる。吉岡(1999)は車両での低減対策として、軽量化、軸配置変更、バネ系変更、車輪フラット管理を挙げている。車両を軽量化することによる振動レベルの低減は、新幹線および在来線の各車両の走行にともなう振動の測定結果から確認されている。また、軸配置変更とは車両長、軸距、台車中心間隔を変更することであり、このことにより現行車両と比較して3~3.5dB低減されると報告されている。

### (1-b)軌道における低減対策

軌道における低減対策として、走行路平滑化、低バネ化、高剛性化、フローティング軌道の利用などがある。走行路平滑化は、線路の不陸にともなって発生する振動の低減を図る方法であり、ロングレールの利用、レール削正、軌道狂い管理の実施が考えられる。低バネ化とは、バラスト軌道におけるバラストマット、弾性枕木の利用、スラブ軌道における低バネパッドなどの利用により、防振効果を図る方法である。これらの方法は低振動数側での効果は限定的であるが、50Hz以上では5~10dB程度の防振効果が得られるとされる。早川(2000a)はバラストマットの敷設前後による地下鉄のトンネルにおける各所の防振効果を実測により確認している。しかし、路盤が軟弱である場合に低バネ化の効果は限定的になるものと考えられる。そこで、このような路盤に対しては逆に軌道の剛性を高めることで振動低減を図ることができる。原ほか(2004)は新幹線走行にともなう沿線地盤振動低減を目的として、高架橋補強工法の開発を行っている。フローティング軌道とは、道床自体を防振装置で支持することにより振動低減効果を得ることのできる軌道である。三輪ほか(1999)はコンクリート道床直結軌道に対し、道床自体を防振支持する工法について実験を行ったところ、40Hz以上で12dB以上の防振効果があることを確認している。鈴木(2007)もコイルバネで支持されたフローティング軌道に対して振動測定を実施し、50Hz以上で7dBの低減効果があることを確認している。

### (2) 地盤における低減対策

地盤における低減対策は、軌道から地盤に伝達された振動が建物基礎への伝搬を低減させる対策である。ここでは地盤内に設置される対策について概説し、建物基礎と地盤との境界に防振シートや防振壁を設置する方法については次項で述べる。

早川(2000b)は地盤内の振動遮断法について、EPS (Expanded Poly-Styrene) 製防振壁、中空PC壁体、鋼矢板製防振壁、ガスクッション製防振壁、コンクリート製防振壁の対策事例を紹介している。これらの工法による振動低減効果の共通的な特徴として、対策位置付近の振動低減効果は顕著であるが、対策位置から離れるにしたがい防振効果が低下することが挙げられる(例えば、西村ほか(2000)、田口・長瀧(2000)、原(2002))。これらの振動対策に関する既往の研究は比較的多く、各工法の振動低減特性については早川(1999)に詳しい。

以上は、軌道から発生した振動を1箇所の対策で低減させる方法であるが、軌道の周辺地盤の振動を軌道付近の地盤内で低減させる試みも検討されている。竹宮ほか(2000)は、WIBと称する斜めソイル杭の柱列組を地中に構築することにより、WIB構造と周辺地盤との間で生じる動的相互作用により地盤振動を拘束する工法の解析的研究を行っている。鈴木・川久保(2005)は軌道の左右にプラスチック製の遮断壁を構築して、鉄道軌道から発生する振動をその遮断壁内に囲い込む工法の研究を行っている。

### (3) 建物基礎・躯体における低減対策

建物基礎・躯体における振動低減対策として、基礎防振シートを設置する方法、建物下部に防振装置を設置する方法、TMD を設置する方法がある。防振機能を備えた免震構法に関する研究もあるが、この研究については免震構法による振動低減対策として(4)で述べる。

#### (3-a) 基礎防振シート(防振壁を含む)を設置する方法

基礎防振シートを設置する方法は、基礎下または基礎側面に Young 率の低い部材（発泡スチレン、エスレン、ゴムなど）を敷くことにより防振効果を期待する方法である。対策を実施しても居室空間の使用が制限されず、対策費用が安価であることを背景として、前述した低減対策(1)、(2)と比較すると、これまでに多くの研究および実施例が報告されている。羽染(1998)は地下貨物線に近接したマンションにおいて軌道側の基礎側面に発泡スチレン、その他の基礎部分に防振ゴムを設置し、振動加速度レベルについてこれらの低減対策を実施しなかった場合の予測結果と対策後の実測結果とを比較している。岩本ほか(2007)は地下鉄軌道の直上および隣接する集合住宅に設置した防振シート（防振用ゴムシートおよび発泡プラスチック製シート）の効果を施工過程ごとに測定している。

地下階数が多い建物の場合は、地下鉄のトンネルに対して地下階が横に位置することから、地下鉄振動が直接地下壁面に到来する。そこで、地下壁面に防振効果の期待できる部材を適用し、振動低減を図ろうとする研究や実施例も見られる。石崎ほか(1998)は地中連続壁または擁壁と躯体との間に防振ゴムを介在させた空間を設ける工法の研究を解析的に行っている。また、中澤・大迫(2007)は EPS を用いた防振工法について実大部分模型実験を実施し、小林(2007)は防振壁の材料として特殊ポリウレタンを設置した場合の防振事例を紹介している。

ただし、基礎防振シートは建物基礎に設置するため、防振シートの有無による防振効果を確認した研究例は少なく、防振材による振動の遮断メカニズム、性能予測、評価については不明確な点があり（清水(2007)）、定量的評価には課題が残されていると考える。

#### (3-b) 建物下部に防振装置を設置する方法

後述する免震構法による鉄道振動の低減効果に関する研究や測定事例は比較的多いが、これらのような免震構法とは異なり建物全体の防振に特化した防振装置の考案に関する研究例も見られる。平松(2007b)は、支持材としてスプリングと粘弾性ダンパーを組み合わせた防振装置を考案し、実験建物による振動測定を行っている。この工法により 63Hz 付近で 20dB の低減効果を確認している。

#### (3-c) TMD を設置する方法

TMD は、構造物の固有振動数にほぼ等しい振動系を構造物の適切な場所に設置して、構造物本体の振動を低減するものである。この TMD の原理を利用して、細野ほか(1987)は地下鉄振動にともなう RC 造床スラブの振動低減を行い、約 10dB の振動低減効果を確認している。ただし、TMD が固体音の低減対策として適用される事例はほとんどない。

#### (4) 免震構法による振動低減対策

免震構法に利用されるゴムは鉄筋コンクリートと比較して Young 率が十分小さく、防振作用があると考えられていることから、免震構法の採用による固体音領域における振動低減効果に関する研究が近年多く見られる。

寺村ほか(1991)は、地上軌道から発生する振動が医療機器に及ぼす影響を低減させるために、厚肉積層ゴムによる免震・除振システムを開発した。また、期をほぼ同じくして地上軌道に接している 9 階建ての事務所も、耐震安全性の確保と鉄道振動の低減を目的として建設され、予測された防振効果を実測により確認している(越田(1993))。このような免震と防振の機能を兼ね備えた免震構法の開発は大迫ほか(1995)、木村ほか(1995)、中澤ほか(1995)によっても実施されている。また、阿部ほか(1994)は地下鉄軌道からの固体音が問題になると予想されたことを動機として免震構法を採用した事例を紹介している。武居ほか(2007)は軌道上空にある建物の防振性能を高めるために、鉛直剛性の低い積層ゴムを中間階免震構法に適用した場合の防振効果について実験的、解析的検討を行っている。ただし、一定の防振効果を期待することはできるものの、地盤条件によっては防振効果を期待できない場合もあると報告している。

また、積層ゴムによる振動低減効果に関する実験的研究として渡邊ほか(2003)の研究がある。渡邊ほかは積層ゴムに支持された重錘を用いてスイープ試験を行い、実験結果から得られる応答曲線が 1 質点系の理論共振曲線と同様であることを確認している。

免震構法による振動低減効果や固体音の低減効果に関する実測研究は多い。近藤・大脇(1998)は、鉄道軌道に近接する 10 階建て免震集合住宅を対象に、基礎と各階で振動レベルを測定した結果、16~125Hz 帯域で防振効果が得られたと報告している。安藤(1996)は 9 階建て事務所ビルを対象に実測を行い、1 質点系の共振曲線を用いた予測値と実測値とが整合していることを確認している。中澤ほか(1998)は地下鉄軌道の近傍に立地する 6 階建て RC 造建物の工事進捗にともなう振動伝搬の実態を把握する測定を実施して、建物の完成後では振動数が高くなるにしたがい振動加速度レベルが低減していると報告している。松岡ほか(1999)、松岡(2007)は 12 階建て集合住宅における地下鉄振動の防振効果を確認し、63Hz 付近で免震階に対する各階の伝達率が 15~20dB 低減することを確認した。綿谷ほか(2002)は 26 階建て集合住宅における地下鉄振動の防振効果を確認し、63Hz 付近で免震階に対する各階の伝達率が 5~10dB 低減することを確認した。ただし、松岡ほか(1999)と綿谷ほか(2002)の計算した伝達率は、いずれも柱近傍から離れたスラブや耐圧版で測定されたデータから駆動点インピーダンスによる補正を行った計算値である。戸松ほか(2002)は同一敷地内に並列して建つ免震建物と非免震建物に対して、加振器を用いた建物内の振動伝搬特性の把握のための実験を行っている。駆動点インピーダンスによる補正を行った結果、免震構法による振動低減効果が約 20dB 程度であることを確認した。ただし、鉄道振動に対する防振を目的としたものではない。

以上の研究は、免震構法の採用により固体音領域において振動低減効果があることを確認した

ものであるが、一方、免震構法を採用しても振動低減効果が低いかほとんどないと報告している既往の研究もある。また、免震構法による振動低減効果を予測するために、多くの研究は1質点系モデルによる理論共振曲線を用いているが、1質点系モデルでは過大評価となるため多質点系モデルで評価する必要があるとする研究もある。山川ほか(1999)は新幹線沿線に建つ免震構法を採用した工場に対して振動測定を行った結果、1質点系モデルの共振曲線とは異なる伝達率となったことを報告している。さらに、20～100Hzの振動数帯域で振動加速度レベルが約0～5dB増大しており、免震構法に対して防振効果を期待することは困難であると報告している。野路ほか(2004)は20階建て集合住宅に対して高架軌道から発生する鉄道振動に関する実測を行った結果、31.5Hzでほぼ0dB、63Hzで約5dB程度の防振効果しかないことを確認している。また、野路ほか(2004)は多質点系モデルによる解析を実施して、高次モードの影響により1質点系の理論共振曲線に見られるほど固体音領域における振動低減効果は大きくないことを確認している。同じく山岸ほか(2005)は13階建て地下鉄振動を受けるRC造集合住宅に対して測定した結果、免震構法による振動低減効果はほとんどないことを報告している。

また、免震構法による振動低減効果を測定したものではないが、免震建物内の振動伝搬性状を測定したものに漆戸ほか(1994)がある。漆戸ほかは同一敷地内に並列して建つ3階建てRC造の免震および非免震集合住宅に対して、インパルスハンマーによる加振実験を行った結果、免震建物内の振動加速度レベルが非免震建物と比較してやや大きくなることを確認している。

#### (5) 内装における低減対策

固体音を内装で低減させる代表的な方法に浮き構造がある。1.1.2項で既に述べたが浮き構造とは、躯体で構成された室内に、防振材や緩衝材を介した空間を構築して、躯体から伝達される固体音の低減を図る工法である。岩瀬ほか(1978)は地下鉄軌道に近接する建物に浮き構造を適用し15dBの振動低減効果を確認している。志村ほか(1982)は浮き床を1質点系に置換し並進モードと曲げモードの重ね合わせにより簡易的に振動低減量を評価できることを示している。平松ほか(1989)は地下鉄振動を対象に地下にある会議室に対して浮き構造を採用し、15dB以上の低減効果を確認している。なお、平松ほかは実測による共振曲線が1質点系の並進モードの共振曲線とほぼ一致していることを示している。他にも田野(1996)、渡辺(1996a)、渡辺(1996b)、司馬(1996)などが浮き構造における振動低減効果の実測研究を行っている。

また、多くの浮き構造は建物の居室の一部に適用する例が多いが、高架下建物の防音および防振工法として吊り構造を適用した事例もあるほか(大迫ほか(1998))、集合住宅など事後対策に制限がある場合の対策として居室の二重床を利用して振動低減を図ろうとする研究もある(羽染(2007))。

ただし、浮き構造は一定の振動低減効果を得ることができるが、建物内に新たな造作を施す必要があるため、居室空間の利用が制限されると同時に、相応の建築費が必要となる。

浮き構造の他にも仕上げ材により音響放射を低減する工法に関する既往の研究もある。ただし、浮き構造と比較すると研究の数は少ない。竹ヶ原ほか(1999)は、弾性接着剤を使用した改良 GL 工法、および防振ゴムを使用した工法の実験的研究を行っているが、固体音領域では大きな防振効果が得られていない。また、山下ほか(1999)は軌道近傍に建つ宿泊施設に対して、種々の仕上げに対する音響放射係数を実測により算定している。



### 1.3 本論文の構成

本論文は、全 6 章で構成されている。図 1.2 に固体音領域における振動問題の体系と本論文の研究対象の関係図を示す。

第 1 章では、まず固体音の予測および低減対策に関する背景と本研究の目的について述べ、次に本研究分野における既往の研究、本論文の構成について述べる。

第 2 章では、埋込みのない剛基礎を仮定した既往の評価法を応用して、柔基礎の入力損失特性を簡易に評価する方法を提案する。まず、この簡易評価法の導出方法について概説し、続いて簡易評価法に対する基礎の入力損失特性に関連する各種パラメータの影響、実測結果との比較による簡易評価法の検証と考察、および剛基礎を仮定した既往の評価法と簡易評価法による評価結果の差異について述べる。

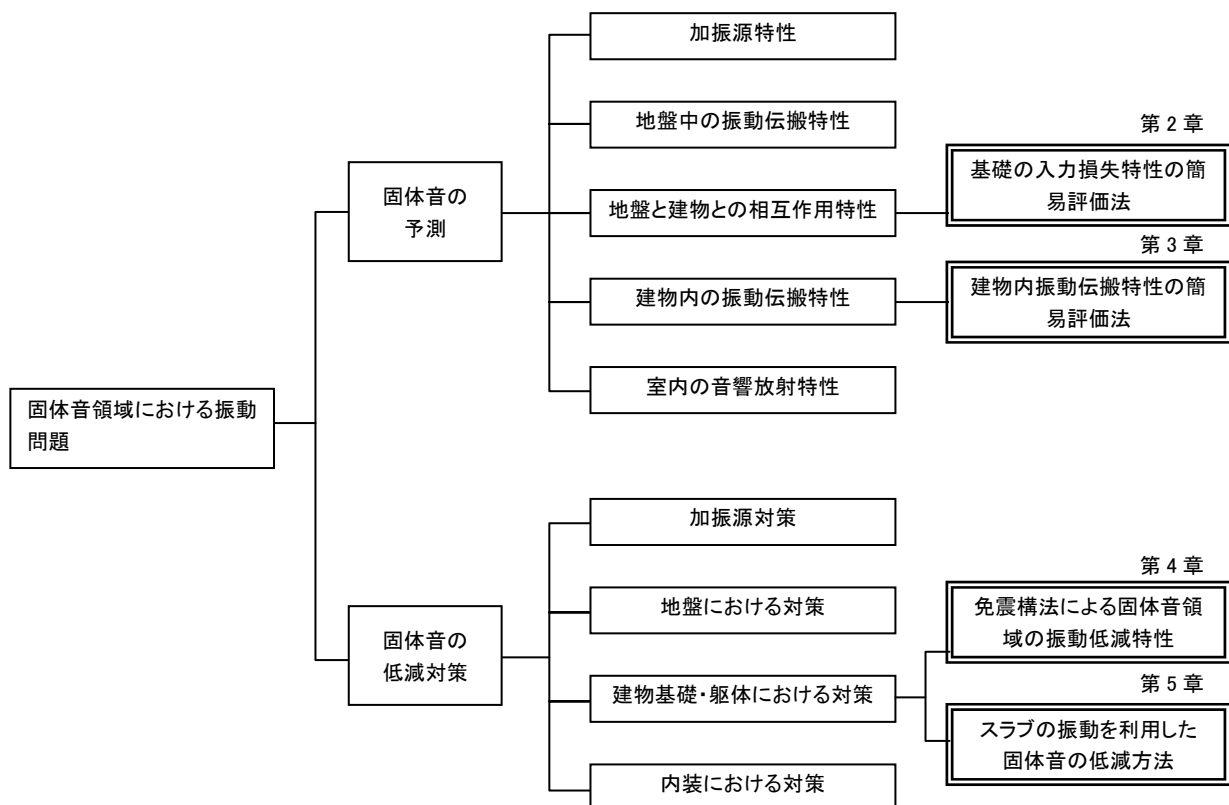


図 1.2 固体音領域における振動問題における本論文の位置づけ

第3章では、多質点系モデルを用いた建物内の振動伝搬特性を簡易に評価する方法を提案する。まず、評価方法のフローおよび各段階の計算方法について述べ、次に実測結果との比較による簡易評価法の検証と考察について述べる。

第4章では、固体音の低減対策として有効とされる免震構法について、その振動低減効果を解析的に明らかにする。はじめに、実測データの蓄積を目的として20階建て集合住宅に対して実施した振動測定の概要および結果について述べる。次に、実測した建物を含む階数の異なる試設計された免震建物の振動解析を実施して、上記実測結果との整合性、および振動低減に寄与する要因について述べる。

第5章では、スラブをTMD部材として利用する新しい固体音の低減対策工法を提案し、低層および高層建物に対してこの対策工法を適用した場合の解析結果について述べる。

第6章に、本研究の結論を記す。

参考文献（第1章）

Cremer, L. and Heckl, M. (1988): Structure-borne Sound, Springer-Verlag, pp.342-370

Fujiwara, K. (1983): Numerical study on the structure-borne sound propagation through the junction with blocking-mass, J. Acoustic Soc. Jpn. 4, pp.13-25

Luco, J. E. (1969): Dynamic Interaction of a Shear Wall with the Soil, J. Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.95, pp.333-346

Lyon, R. H. (1975): Statistical Energy Analysis of Dynamical Systems: Theory and Application, Cambridge MHSS: MIT Press

Matsushima, Y. (1975): Spectra of Spatially Variant Ground Motions and Associated Transfer Functions of Soil-Foundation Systems, 第4回日本地震工学シンポジウム講演集, pp.351-358

Ray, D. and Jhaberi, D. P. (1977): Effective Seismic Input through Rigid Foundation Filtering, Nuclear Engineering and Design, Vol.45, pp. 185-195

Zeman, J. L. and Bogdanoff, J. L. (1969): A Comment on Complex Structural Response to Random Vibrations, AIII Journal, Vol.7, No.7, pp.1225-1231

安達直人, 引田真規子, 渡辺哲史, 宮本祐司 (2006): 実測記録に基づく低層建物の入力損失効果の検討 (その1) 観測記録の分析による入力損失, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 分冊, pp.445-446

阿部隆之, 荘大作, 今沢民雄, 相沢覚, 榎田裕 (1994): 積層ゴムによる地下軌道からの振動低減効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学分冊, pp.1541-1542

安藤啓 (1996): 免震・防振構法建物の防振性能 (事務所ビル), 音響技術, Vol.25(1), pp.30-32

安藤啓, 田野正典, 峯村敦雄 (1998): 鉄道からの固体音伝搬特性に関する研究 —JR 小倉駅の例—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.245-246

- 井口道雄 (1973): 地震動の位相差及び地盤－構造物の相互作用を考慮した地震応答, 日本地震工学シンポジウム論文集, pp.299-300
- 石崎伸次, 平松友孝, 小堺裕司, 大川平一郎 (1993): 地下鉄軌道振動・固体伝搬音に関する測定事例 その 1 地下鉄構築から建物への振動伝搬について, 日本音響学会研究発表会講演論文集, Vol.1993, No.春季 Pt 2, pp.591-592
- 石崎伸次, 矢田雅一, 平松友孝 (1998): 防振地下壁の防振効果予測に関する解析的研究, 大成建設技術研究所報, 第 31 号, pp.199-202
- 石橋敏久, 八幡夏恵子, 堀越清視, 桜庭和子 (2000): 電車走行時の地盤と建物基礎への振動伝播性状に関する研究, 鹿島技術研究所年報, 第 48 号, pp.99-104
- 石橋敏久, 小林俊夫, 堀越清視, 安藤啓 (2002): 振動台加振による近接建物内での振動応答, 鹿島技術研究所年報, 第 50 号, pp.107-112
- 井上勝夫, 木村翔, 北村訓久, 稲留康一, 益田勲 (1992): 軌道上建築物に対する固体音制御のための列車走行時の加振力特性に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, Vol.432, pp.11-20
- 入江良彦 (1992): SEA 法による固体伝搬音解析, 音響学会誌, No.48, pp.433-444
- 岩瀬昭雄, 松田由利, 橋秀樹, 石井聖光, 有田陽一 (1978): 地下鉄振動の近傍する建物への影響 (その 2. 建物側における振動・騒音の低減対策例), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 計画系分冊, pp.171-172
- 岩本毅, 山岸邦彰, 有松重雄, 赤尾伸一, 原田浩之, 野路利幸 (2004): 鉄道軌道に近接する免震建物の振動伝搬特性 (その 2) 基礎の入力損失と免震層の振動伝搬特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.259-260
- 岩本毅, 山岸邦彰, 池原誠一 (2007): 地下鉄固体音対策 防振シートを用いた防振工法による地下鉄固体音の低減対策建物における振動伝搬特性, 音響技術, Vol.36, No.2, pp.34-39

- 内田雄一郎, 石井和俊 (2002): 摩擦杭基礎工法を用いた建物の鉄道振動事例, 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, Vol.2002, pp.57-60
- 漆戸幸雄, 綿谷重規, 須賀昌昭 (1991): 大スパン鉄骨構造建築物における固体伝搬音の伝搬性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D 環境工学分冊, pp.283-284
- 漆戸幸雄, 小谷朋央貴, 須賀昌昭, 綿谷重規 (1994): 免震構法建物における建物内加振時の振動伝搬特性, 日本音響学会研究発表会講演論文集, Vol.1994, No.秋季 Pt 2, pp.909-910
- 大迫勝彦, 北澤章, 佐藤聖三, 町田重美, 蓮田常雄 (1995): 免防振構法の基礎実験 その 1 - 免防振装置の設計と単体試験 -, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学(1)分冊, pp.313-314
- 大迫勝彦, 国弘仁, 山田眞左和, 山下拓伸, 深尾康三, 荘大作, 阿部隆之 (1998): 高架下建物の防音防振工法に関する研究 その 1, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.277-278
- 大川平一郎, 村石喜一, 平松友孝, 浜田幸雄, 小堺祐司 (1991): 鉄道軌道の振動伝搬と建物における放射固体音の影響, 日本音響学会, 建築音響研究委員会資料, AA 91-12, pp.1-11
- 川久保政茂, 林田敏弘, 三輪晋也, 杉村義広, 栗田哲 (1999): 電車走行に伴う建物内振動伝搬の実態に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, Vol.523, pp.7-14
- 木村正彦, 山岡英明, 国弘仁, 蓮田常雄, 林田敏弘 (1995): 免防振構法の基礎実験 その 2 - 立体鋼構造試験体による振動大実験 -, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学(1)分冊, pp.315-316
- 古宇田潔, 麦倉喬次, 細野利郎, 田野正典 (1979): 建物内を伝搬する地下鉄振動の測定例, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 計画系分冊, pp.55-56
- 小堺裕司, 浜田幸雄, 平松友孝, 橋詰尚慶, 大川平一郎 (1989): 交通振動の建物への伝搬特性に関する実験的検討 (その 3: 地盤から基礎底盤への振動入力特性), 日本建築学会大会学術講演梗概集, D 分冊, pp.255-256

- 小堺裕司, 大川平一郎, 平松友孝, 浜田幸雄 (1991): 新幹線高架軌道からの振動測定事例, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D 環境工学分冊, pp.327-328
- 小堺裕司, 大川平一郎, 平松友孝, 浜田幸雄 (1992): 地下鉄軌道近接建物における軌道振動の伝搬特性に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学分冊, pp.51-52
- 小堺裕司, 平松友孝, 石崎伸次, 大川平一郎 (1993): 地下鉄軌道振動・固体伝搬音に関する測定事例 その 2 軌道振動の建物躯体内伝搬特性について, 日本音響学会研究発表会講演論文集, Vol.1993, No.春季 Pt 2, pp.593-594
- 越田洋 (1993): 免震ビルの地震時加速度低減効果と鉄道振動防振効果について, ビルディングレター 93.2, pp.13-17
- 小島宏章, 福和伸夫, 飛田潤 (2005): 強震観測・常時微動計測に基づく中低層建物の入力損失効果に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.587, pp.77-84
- 小西雅, 羽染武則, 杉野潔 (1996): 掘割線路際における建物への列車走行振動の実測結果 — その 1 建物建設前後における列車走行振動の比較 —, 日本音響学会研究発表会講演論文集, Vol.1996, No.春季, Pt2, pp.787-788
- 小林久良雄 (2007): 特殊ポリウレタン防振材を用いた防振工法による地下鉄固体音の低減対策, 音響技術, Vol.36, No.2, pp.40-43
- 小林真人, 塩田正純 (1997): 建築物における鉄道振動の調査(その 1) -地盤から建物入力系の応答-, 日本音響学会研究発表会講演論文集, Vol.1997, No.秋季, Pt2, pp.703-704
- 小林真人, 塩田正純, 山下恭弘 (2001): 環境振動による固体伝播音予測に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文集, Vol.542, pp.23-28
- 近藤誠一, 大脇雅直 (1998): 鉄道近接免震集合住宅への固体音の伝搬に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.239-240
- 齊藤正人, 池亀真樹, 棚村史郎, 渡邊啓行 (2003): 複合する非線形条件下における大型基礎の入力損失効果に関する評価, 土木学会論文集, No.759, I-67, pp.143-155

- 坂本信也, 石井美喜子, 平松友孝, 大川平一郎 (1989): 地下鉄軌道が近接する建物の固体伝搬音伝搬特性実測例, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D 分冊, pp.261-262
- 司馬義英 (1996): 地下鉄からの固体音対策 (文京シビックホール) , 音響技術, Vol.25(1), pp.48-51
- 柴田昭彦, 増子友介, 宮坂大祐, 蓮田常雄, 藤井光治郎, 伊積康彦 (1999): 地平および地下鉄道に近接する建物の振動伝搬特性 (その 1) 防振建物の工事進捗に伴う振動伝搬の実態, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.269-270
- 清水寧 (2007): 防止ゴム,発泡材を用いた防振地下壁による地下鉄固体音の低減対策例, 音響技術, Vol.36, No.2, pp.19-22
- 志村正幸, 菅広見, 吉田昌樹 (1982): 地下鉄振動の建物への影響と対策例 : その 1 実測調査 : 環境工学, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 計画系分冊, pp.139-140
- 須賀昌昭, 小谷朋央貴, 漆戸幸雄, 綿谷重規 (1994a): 地下鉄走行による建物内振動伝搬性状について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学分冊, pp.1549-1550
- 須賀昌昭, 小谷朋央貴, 漆戸幸雄, 綿谷重規 (1994b): 地下鉄走行に伴う振動の建物内伝搬特性, 日本音響学会研究発表会講演論文集, Vol.1994, No.秋季 2, pp.911-912
- 鈴木健司 (2007): フローティングスラブによる地下鉄固体音の低減対策例, 音響技術, Vol.36, No.2, pp.13-18
- 鈴木一, 川久保政茂 (2005): 鉄道振動低減化対策工法の開発 -その 1 概要-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.235-236
- 田口典生, 長瀧慶明 (2000): 地盤における防振対策効果の解析的検討, 第 35 回地盤工学研究発表会講演集, pp.159-160
- 武居泰, 蓮田常雄, 大迫勝彦, 福島文雄 (1994): 線路上空建物の振動騒音予測に関する研究 その 5 2 次元 FEM による振動解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学分冊, pp.1539-1540

- 武居泰, 藤井光治郎, 伊積康彦, 山田聖治, 蓮田常雄, 中澤俊幸 (2007): 線路上空利用建築物への免震・防振構造システムの適用, 日本建築学会技術報告集, Vol.13(25), pp.49-54
- 武井義正, 麻里哲広, 石山祐二 (1997): 上下振動に対する建物の応答性状 : 鉄道振動を例として, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 分冊, pp.497-498
- 竹内吉弘, 石倉秀敏, 久徳敏治 (1984): 大規模剛基礎を持つ構造物系への入力損失について その 1 振動特性と入力損失について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系分冊, pp.785-786
- 竹ヶ原一彦, 山下拓伸, 大迫勝彦, 羽染武則, 瀬戸山春輝 (1999): 列車振動による居室内騒音振動低減工法の開発 - その 3 対策工法の防振効果についての実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.277-278
- 竹宮宏和, 塩律吉彦, 湯浅聡文 (2000): 高速列車走行による沿線地盤振動性状と振動対策工法 - X-WIB, 土木学会論文集, No.661, I-53, pp.33-42
- 田中治 (1996): 建築構造体における固体伝搬音の波動性を考慮した伝搬予測手法に関する基礎的研究, 東京大学 博士論文
- 田中治, 久我新一 (1988): 3次元直交交差部における曲げ波, 縦波およびねじれ波の伝搬性状の解析 建築躯体における固体音伝搬性状の研究 - 第 3 報, 日本建築学会計画系論文報告集 No.389, pp.10-19
- 田中洪 (1981): 壁体と床板の交叉部における斜め入射曲げ波の伝播について, 日本音響学会 建築音響研究委員会資料, AA81-12
- 棚瀬廉人, 山川高史, 岸永伸二, 川上福司 (1999): 免震構造を有する半導体工場における鉄道振動対策と評価, 日本音響学会研究発表会講演論文集, Vol.1999(1), pp.757-758
- 谷垣正治, 岩本毅, 山岸邦彰, 原田浩之, 嶋田泰, 野路利幸 (2004): 鉄道軌道に近接する免震建物の振動伝搬特性 (その 3) 建物高さ方向の振動伝搬特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.261-262



- 田野正典 (1996): JR に隣接したホテルの振動・騒音対策, 音響技術, Vol.25(1), pp.20-23
- 津野究, 古田勝, 藤井光治郎, 長嶋文雄, 日下部治 (2005): 地下鉄シールドトンネルから伝播する広帯域振動の減衰特性, 土木学会論文集, No.792/III-71, pp.185-197
- 寺村彰, 吉原醇一, 中村充, 安井讓, 中村嶽, 鈴木哲夫 (1991): 厚肉積層ゴムによる免震・除振システムの開発 (その3 上下用粘性ダンパーの微動・強震特性), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B 構造 I 分冊, pp.693-694
- 戸松征夫, 渡邊秀夫, 飯塚信一, 松岡明彦, 佐々木亮治, 土屋祐造 (2002): 免震建物と非免震建物の振動伝搬実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.149-150
- 中澤俊幸, 大迫勝彦, 蓮田常雄, 町田重美, 山田眞左和 (1995): 免防振構法の基礎実験 その3 -振動大実験のシミュレーション解析-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 (1)分冊, pp.317-318
- 中澤俊幸, 山口昭一, 藤井光治郎, 武居泰, 蓮田常雄, 伊積康彦 (1998): 地下鉄道近傍に立地する免震建物の振動伝搬特性 (その1) 工事進捗に伴う振動伝搬の実態, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.241-242
- 中澤真司, 大迫勝彦 (2007): EPS を用いた防振工法による地下鉄固体音の低減対策例, 音響技術, Vol.36, No.2, pp.27-33
- 縄岡好人ほか(1991): 電車固体音の予測に関する研究 (その1) 地下鉄固体音の建物内伝搬, 日本音響学会講演論文集, pp.723-733
- 縄岡好人, 吉原醇一, 中村充, 平野滋, 安井讓 (1992): 地下鉄振動の伝搬性状に関する研究(その3) 電車固体伝搬音の建物内伝搬性状と予測システム全体のまとめ, 大林組技術研究所報, No.44, pp.39-44
- 縄岡好人 (1997): Lagrange の運動方程式を用いた波動伝搬理論による固体音の建物内伝搬予測に関する研究, 九州芸術工科大学 博士論文
- (社) 日本建築学会 (1996): 入門・建物と地盤との動的相互作用

- 西村忠典, 庄司正弘, 原文人, 植野修昌, 早川清 (2000): 地中防振壁による列車振動対策に関するシミュレーション解析, 第 35 回地盤工学研究発表会講演集, pp.157-158
- 二宮利治, 佐々木洋, 村本和博, 原克巳, 多賀謙蔵, 田代靖彦, 山本健二 (1998): 新交通システム軌道下居室の防振床による居住性改善の試み : その 1. 現状架構の振動性状の把握, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.281-282
- 野口祐司, 藤井光治郎, 武居泰, 伊積康彦, 濱口雅義, 山本光博 (2002): 駅複合建物の鉄道振動伝搬特性 : その 1 工事進捗に伴う地盤・基礎の振動特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.151-152
- 野路利幸, 山岸邦彰, 谷垣正治, 小坂英之, 岩本毅, 原田浩之 (2004): 鉄道軌道に近接する免震建物の振動伝搬特性 (その 4) 免震建物の上下動低減効果の解析的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.263-264
- 野中康友, 宮川忠明, 木田寛治, 野本利英 (2006): 敷地近傍を地下鉄が走行する集合住宅の固体伝搬音対策 計画段階の固体振動予測と竣工後の検証, 安藤建設技術研究所報, Vol.12, pp.1-8
- 蓮田常雄, 国弘仁, 藤井光治郎, 伊積康彦 (1994): 線路上空建物の振動騒音予測に関する研究 その 4 建物内の振動伝搬解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学分冊, pp.1537-1538
- 羽染武則, 益田勲, 井上勝夫 (1989): 地下軌道直上建物への固体伝搬音実測例, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D 分冊, pp.265-266
- 羽染武則 (1998): 地下貨物線に近接したマンションにおける固体伝搬音の予測と実測結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.247-248
- 羽染武則 (2007): 居室二重床による地下鉄固体音の低減対策例, 音響技術, Vol.36, No.2, pp.57-66
- 濱口雅義, 武居泰, 蓮田常雄, 藤井光治郎, 増子友介, 柴田昭彦 (1999): 地平および地下鉄道に近接する建物の振動伝搬特性 (その 2) 免震建物の工事進捗に伴う振動伝搬の実態, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.271-272

- 早川清 (1999): 地盤振動の伝搬過程における防止対策の背景と動向, 日本音響学会誌 55 卷, 6 号, pp.449-454
- 早川清 (2000a): 改良軌道による地下鉄振動の軽減対策, 土木学会論文集, No.659, III-52, pp.17-25
- 早川清 (2000b): 地盤内の振動遮断法に関する国内外の現状, 第 35 回地盤工学研究発表会講演集, pp.149-150
- 林田敏弘, 川久保政茂, 三輪晋也 (1996): 鉄道から固体音伝搬予測の現状 振動加速度の伝搬について, 日本音響学会研究発表会講演論文集, Vol.1996, No.春季 Pt 2, pp.783-786
- 原恒雄, 吉岡修, 神田仁, 舟橋秀麿, 根岸裕, 藤野陽三, 吉田一博 (2004): 新幹線走行に伴う沿線地盤振動低減のための高架橋補強工の開発, 土木学会論文集, No.766, I-68, pp.325-338
- 原文人 (2002): 地中防振壁による列車振動対策 (特集 基礎工と地盤振動), 基礎工, Vol.30(1) (通号 342), pp.58-60
- 原田浩之, 谷垣正治, 岩本毅, 山岸邦彰, 野路利幸 (2007): 実測による地下鉄振動の建物内振動伝搬特性に関する研究(その3)同一軌道近傍に建つ2建物の振動測定結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.329-330
- 平野滋, 縄岡好人 (1996): 地下鉄構築直上に建設された寮, 音響技術, Vol.25(1), pp.12-14
- 平松友孝, 浜田幸雄, 小塚裕司, 橋詰尚喜, 大川平一郎 (1989): 地下鉄からの固体伝搬音低減対策実施例, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D 分冊, pp.263-264
- 平松友孝 (2007a): 地下鉄固体音の発生メカニズムと予測, 低減対策の考え方, 音響技術, Vol.36, No.2, pp.1-8
- 平松友孝 (2007b): 建物全体防振による地下鉄固体音の低減対策, 音響技術, Vol.36, No.2, pp.44-47
- 藤井光治郎, 蓮田常雄, 武居靖 (1996): 線路上空利用建物の振動騒音予測, 音響技術, Vol.25(1), pp.2-5

藤井光治郎, 蓮田常雄, 武居泰 (1997): 駅建物への鉄道振動入力評価と建物内振動伝搬解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.131-134

藤井光治郎, 伊積康彦, 蓮田常雄, 武居泰, 中沢俊幸, 中川理 (1998): 地下鉄道近傍に立地する免震建物の振動伝搬特性 (その 2) 数値解析による検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.243-244

藤井光治郎, 大迫勝彦, 蓮田常雄, 武居泰 (1999): 鉄道からの環境振動予測 — 駅建物形態別の数値解析 —, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.287-290

藤井光治郎, 蓮田常雄, 武居泰, 池亀真樹, 濱口雅義 (2000): 振動遮断材による列車振動低減効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.297-298

藤井光治郎, 武居泰, 伊積康彦 (2006): 地下鉄道近接建物の振動伝搬予測に関する研究 : その 6 トンネル-地盤-建物系振動解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.199-200

藤原恭司 (1981): ブロッキングマスを有する結合部での固体音伝播について, 日本音響学会 AA81-12, 建築音響研究委員会資料

藤原恭司 (1994): 建物内の固体伝搬特性, 日本音響学会誌, 50 巻, 4 号, pp.319-324

細野利郎, 田野正典, 大伴尚也 (1987): 動吸振器による RC 床スラブの地下鉄振動制御, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D 分冊, pp.71-72

堀越清視, 石橋敏久, 八幡夏恵子 (1999): 電車走行時の地盤-基礎の振動伝播性状 (その 2) FEM 解析による地盤の距離減衰と基礎有無の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.343-344

松岡明彦, 渡辺秀夫, 宮尾健一 (1999): 免震構造の集合住宅における地下鉄からの固体伝搬音低減効果について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.275-276

松岡明彦 (2007): 集合住宅における免震構造による地下鉄固体音の低減対策例, 音響技術, Vol.36, No.2, pp.52-56

- 松田由利, 橘秀樹, 石井聖光 (1979): 建物構造体中における固体音の伝搬性状, 日本音響学会誌, 35 卷, 11 号 pp.609-615
- 峯村敦雄, 田野正典, 安藤啓 (1994): 拡張 SEA を用いた建物内固体伝搬音の予測方法と適用例, 日本建築学会計画系論文集, Vol.461, pp.17-23
- 三輪晋也, 林田敏弘, 川久保政茂 (1999): 防振支持された軌道構造による鉄道振動低減に関する実証的研究, 日本建築学会計画系論文集, Vol.526, pp.9-16
- 森清宜貴, 深澤尚宏, 吉江慶祐, 北村春幸, 藤田隆史, 浅野美次, 安田正志 (2006): 微振動測定に基づく免震建物の入力損失に関する検討, 日本建築学会技術報告集, 第23号, pp.103-108
- 森下真行, 斉藤芳人, 藤橋克己, 鶴見真也 (2004): 地下鉄振動の振動伝搬性状について-振動実測調査を通じて-, 前田建設技術研究所報, Vol.45, pp.111-116
- 山川高史, 棚瀬廉人, 岸永伸二, 川上福司 (1999): 地盤から免震建物への固体音伝播性状, 日本音響学会研究発表会講演論文集, Vol.1999(1), pp.759-760
- 山岸邦彰, 岩本毅, 谷垣正治, 原田浩之, 沢田義博, 野路利幸 (2005): 実測による地下鉄振動の建物内振動伝搬特性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.217-218
- 山岸邦彰, 岩本毅, 谷垣正治, 原田浩之, 澤田義博, 野路利幸 (2006): 実測による地下鉄振動の建物内振動伝搬特性に関する研究 (その 2) 直接基礎を有する壁式構造の評価結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.191-192
- 山岸邦彰, 野路利幸, 谷垣正治, 岩本毅, 原田浩之 (2007): 地下鉄振動を受ける基礎の入力損失の簡易評価法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.327-328
- 山下拓伸, 大迫勝彦, 国弘仁, 蓮田常雄, 藤井光治郎, 武居泰 (1998): 線路上空建物の振動騒音予測に関する研究 : その 9 建物内に軌道を有する場合の振動伝搬(鉄道振動(その 1)), 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.273-274

- 山下拓伸, 大迫勝彦, 竹ヶ原一彦, 羽染武則 (1999): 列車振動による居室内騒音振動低減工法の開発 -その 1 線路近傍のホテル客室における列車振動の実測-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.265-266
- 山田努, 武居泰, 藤井光治郎 (2005): 地下鉄道近接建物の振動伝搬予測に関する研究 その 4 数値解析による模型実験結果の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.233-234
- 山原浩 (1969): 地震時の地動と地震波の入力損失 (第 1 報), 日本建築学会論文報告集, 第 165 号, pp.61-66
- 山原浩 (1970): 地震時の地動と地震波の入力損失 (第 2 報), 日本建築学会論文報告集, 第 167 号, pp.25-30
- 山原浩, 塩谷清人 (1978): 実測例による地震波の入力損失の検討, 日本建築学会論文報告集, 第 279 号, pp.53-59
- 吉岡修, 芦谷公稔(1995): 新幹線鉄道振動の発生・伝播モデル, 物理探査, 第 48 巻, 第 5 号, pp.299-315
- 吉岡修 (1999): 鉄道振動の防止対策法, 日本音響学会誌, 55 巻, 6 号, pp.455-460
- 吉田一博 (2007): 地下鉄から生じる地盤振動伝播に関する基本的な検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.325-326
- 吉原醇一, 中村充, 安井譲, 平野滋 (1990): 地下鉄振動の伝搬性状に関する研究 その 4 実測に基づく基礎底盤の入力損失効果の把握, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D 分冊, pp.325-326
- 吉原醇一, 中村充, 安井譲, 平野滋 (1991): 地下鉄振動の伝搬性状に関する研究(その 2) 建物への入力損失効果,建物内の伝搬について, 大林組技術研究所報, No.43, pp.21-28
- 渡辺隆行, 岸永伸二, 川上福司, 山川高史, 石井聖光 (1995): 建物側での鉄道振動伝搬音対策の予測・評価手法の検討 -アクトシティ浜松 大・中ホールの例-, 日本音響学会研究発表

会講演論文集, Vol.1995(1), pp.801-802

渡辺秀夫 (1996a): JR 横須賀線トンネル上集合住宅の騒音防止対策, 音響技術, Vol.25(1), pp.24-27

渡辺秀夫 (1996b): 地下鉄丸の内線に近接して建つ複合ビルの騒音防止対策, 音響技術, Vol.25(1), pp.36-38

渡邊秀夫, 飯塚信一, 松岡明彦, 佐々木亮治, 山内崇 (2003): 加振実験による免震ゴムの鉛直方向の振動伝搬特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.255-256

綿谷重規, 須賀昌昭, 大井尚志, 唐木卓哉 (2002): 免震構造による地下鉄振動防止について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.147-148





## 第2章

# 基礎の入力損失特性に関する簡易評価法の提案と その適用

---

## 2.1 まえがき

本章では、基礎の入力損失特性に関する簡易評価法の提案とその適用について論じる。

固体音を予測する上で、基礎の入力損失特性の評価が重要であることについては第1章の目的で既に述べた。基礎の入力損失特性を評価する方法の中で、従来からよく適用される方法として山原式(山原(1969))と有限要素法が挙げられる。しかし、両方法とも評価精度の確保と評価時間の短縮の両立が困難であり、これらの要求をともに満足する手法の確立が課題となっている。本章に示す簡易評価法は、この課題の解決を図るために提案されるものである。簡易評価法は、建物の実況に適応した簡易なモデルを構築する必要があるため、山原式と比較して解析パラメータはやや増加するが、基礎板厚が変化することによる基礎剛性の変化や、入力変位の非一様性を考慮することができることを特徴とする。

はじめに2.2節では、基礎の入力損失特性の評価方法に関して、埋め込みのない剛基礎を仮定した既往の山原式と、任意の入力変位場に置かれた柔基礎を仮定した簡易評価法の導出方法について述べる。

次に、実存する基礎の入力損失を評価する場合には、基礎の柔性や地盤振動の距離減衰の影響などを適切に評価する必要がある。そこで2.3節では、はじめに鉄筋コンクリート造の長方形基礎板を想定し、基礎の板厚をパラメータとして基礎剛性の変化に対する基礎の入力損失の変化の傾向を確認する。続いて、山原式では基礎を1次元の問題と仮定しているが、提案する簡易評価法では基礎を有限長の平板として扱うことにより基礎幅の違いによる評価差が生じるため、基礎幅による伝達率の影響を確認する。さらに、簡易評価法のパラメータである基礎分割数の影響や加振源からの距離をパラメータとした盤振動の距離減衰の影響についても確認する。

また、簡易評価法の妥当性を確認するために、理論計算または実測による結果と比較をして、同法の適用性や適用限界などを確認する必要がある。2.4節では、簡易評価法の実用化を図る目的から、実存する基礎に対する実測結果との比較により同法の妥当性を確認する。ただし、実測結果と比較する場合に、実存する基礎の多くは簡易解析法が仮定している理想的な基礎と異なっていることに留意する必要がある。そのため、簡易評価法を適用する場合には、実存する基礎に付随する杭や防振材料などの部材の影響を除去する必要がある。本節ではこれらの影響を除去する方法についても述べる。

最後に、従来からよく利用されている山原式の適用範囲を確認することを目的として、2.5節では同式と簡易評価法により計算した基礎の入力損失の比較を行う。このような解析結果を示すことにより、山原式により計算された基礎の入力損失に対する評価差の程度を知ることができ、今後実施される評価の一助になると考える。

2.6節では結びとして、本章のまとめを記す。

## 2.2 基礎の入力損失の簡易評価法の提案

### 2.2.1 剛基礎を仮定した既往の入力損失の評価法

はじめに、山原式の導出方法について述べる。

地表面の地盤振動の変位式を式(2-1)と仮定する。

$$u = u_0 \cos(\omega t - kx) \quad (2-1)$$

ここに、 $u_0$ は地盤振動の振幅、 $t$ は時刻、 $\omega$ は角振動数、 $k$ は波数、 $x$ は基礎の座標値である。剛基礎を仮定することにより、基礎直下の地盤振動の合成変位  $u_t$  は式(2-2)で表現される。なお、 $L$ は基礎長さである。

$$u_t = \frac{1}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} u_0 \cos(\omega t - kx) dx \quad (2-2)$$

式(2-2)は時刻  $t=0$  で最大になるため、式(2-2)に  $t=0$  を代入すると式(2-3)となる。

$$u_t|_{t=0} = \frac{1}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} u_0 \cos(kx) dx = \frac{u_0 \beta}{\pi L f} \sin \frac{\pi L f}{\beta} \quad (2-3)$$

ここに、 $f$ は振動数、 $\beta$ は地盤のせん断波速度である。以上から地表面の変位に対する基礎上の変位の絶対値（伝達率） $\eta(f)$  は式(2-4)で与えられる。

$$\eta(f) = \left| \frac{\beta}{\pi L f} \sin \left( \frac{\pi L f}{\beta} \right) \right| \quad (2-4)$$

### 2.2.2 離散化された梁モデルによる柔基礎の入力損失の簡易評価法の提案

計算条件を山原式と同一とするため、基礎を図 2.1のような地盤バネに支えられている無質量の離散化された梁モデルとして考える。変位は鉛直上向き、回転角は時計周りを正とする。

図中、 $x_i$  ( $i$ は節点番号、以下同じ)は入力絶対変位（以下、入力変位）、 $y_i$ は応答相対変位、 $\theta_i$ は応答回転角、 $k_{bij}$ は基礎剛性、 $k_{gi}$ は離散化された基礎と地盤との相互作用鉛直バネ、 $k_{ri}$ は同回転バネ、 $l_{ij}$ は分割された基礎長さである。なお、入力変位、応答相対変位および応答回転角は Fourier 振幅を表す。

入力変位  $x_i$  は  $n$  分割された基礎の長さに応じて山原式が適用されているものとする。すなわち、分割された基礎を剛基礎とみなし、その基礎長さに対して山原式を適用したフィルタ関数  $\eta'_i(f)$ （以下、変数  $f$  を省略）を乗じた変位を各節点に対する入力変位  $x_i$  とする。このような条件で節点 1, 2,  $n$  における力の釣り合いを記述すると式(2-5)となる。無質量基礎であるため慣性力は無視する。

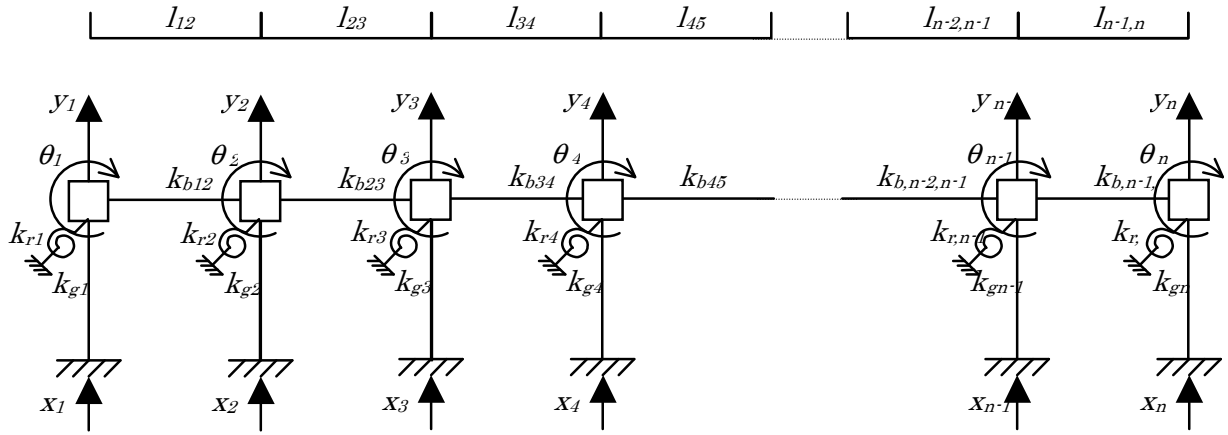


図 2.1 無質量の離散化された梁モデル

[節点 1]

$$\begin{aligned} \bar{k}_{g1}y_1 + (y_1 - y_2)\bar{k}_{b12} - \hat{k}_{b12}(\theta_1 + \theta_2) &= -\bar{k}_{b12}(x_1 - x_2) \\ -(y_1 - y_2)\hat{k}_{b12} + (2\tilde{k}_{b12} + \tilde{k}_{r1})\theta_1 + \tilde{k}_{b12}\theta_2 &= \hat{k}_{b12}(x_1 - x_2) \end{aligned}$$

[節点 2]

$$\begin{aligned} \bar{k}_{g2}y_2 + (y_2 - y_1)\bar{k}_{b12} + (y_2 - y_3)\bar{k}_{b23} + \hat{k}_{b12}\theta_1 + (\hat{k}_{b12} - \hat{k}_{b23})\theta_2 - \hat{k}_{b23}\theta_3 \\ = -\bar{k}_{b12}(x_2 - x_1) - \bar{k}_{b12}(x_2 - x_3) \\ (y_2 - y_1)\hat{k}_{b12} - (y_2 - y_3)\hat{k}_{b23} + \tilde{k}_{b12}\theta_1 + (2\tilde{k}_{b12} + 2\tilde{k}_{b23} + \tilde{k}_{r2})\theta_2 + \tilde{k}_{b23}\theta_3 \\ = -\hat{k}_{b12}(x_2 - x_1) + \hat{k}_{b23}(x_2 - x_3) \end{aligned}$$

[節点 n]

$$\begin{aligned} \bar{k}_{gn}y_n + (y_n - y_{n-1})\bar{k}_{bn-1,n} + \hat{k}_{bn-1,n}\theta_{n-1} + \hat{k}_{bn-1,n}\theta_n &= -\bar{k}_{bn-1,n}(x_n - x_{n-1}) \\ (y_n - y_{n-1})\hat{k}_{bn-1,n} + \tilde{k}_{bn-1,n}\theta_{n-1} + (2\tilde{k}_{bn-1,n} + \tilde{k}_{rn})\theta_n &= \hat{k}_{bn-1,n}(x_n - x_{n-1}) \end{aligned}$$

(2-5)

ここで、記号上のバー(-)は鉛直方向剛性、ハット(^)は鉛直方向または回転方向の変位に対する回転または鉛直方向の剛性、およびティルダ(~)は回転方向の変位に対する回転方向の剛性を表す。 $k_{gi}$ ,  $k_{ri}$ ,  $k_{bij}$  はそれぞれ式(2-6)~式(2-10)で表現される。 $EI$ : 曲げ剛性,  $G$ : せん断弾性係数,  $l_{ij}$ :







## 2.3 簡易評価法の各種パラメータに対する影響

前節に示した簡易評価法を用いて、基礎板厚、基礎幅、基礎の分割数および入力変位の距離減衰が基礎の入力損失の評価に与える影響を検討する。

### 2.3.1 解析モデル

解析モデルは、図 2.2に示す長さ $L$ 、幅 $W$ の長方形基礎である。地盤のせん断波速度を $\beta=200\text{m/s}$ 、基礎の分割数 $n$ は長さ方向に等分割するものとし $n=20$ とした。基礎は鉄筋コンクリート造(以下、RC造)と仮定し、Young率は $E=21\text{kN/mm}^2$ とした。その他のパラメータは、Poisson比を $\nu=0.45$ 、地盤の密度を $\rho=1.7\text{t/m}^3$ とした。

地盤振動の入力は、山原式の仮定と同様に減衰のない水平進行波を基本とする。この場合、式(2-23)において入力変位 $x_i$ は位相は異なるものの振幅は各節点に対して同一であるのに対し、応答相対変位 $y_i$ が各節点で異なるため、伝達率 $T_{Fi}$ は節点ごとに異なる。以下では、正弦波の最大振幅が基礎の中心に位置するときの基礎端部における伝達率を評価する。

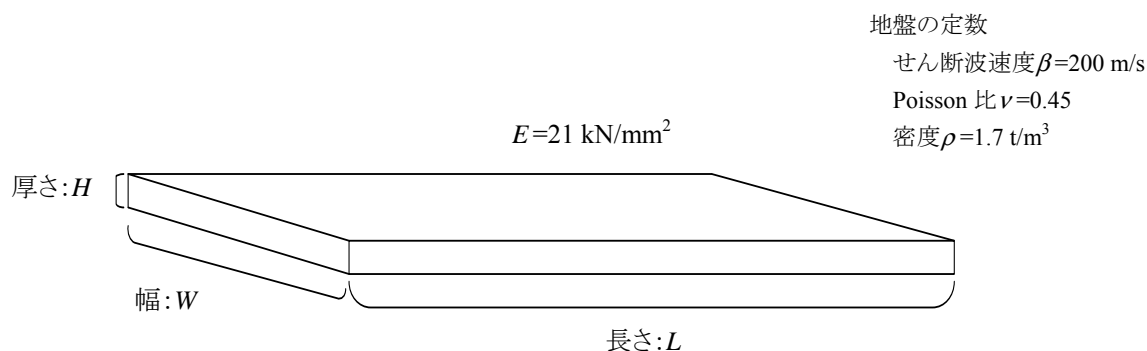


図 2.2 解析モデル

### 2.3.2 基礎板厚と基礎の入力損失との関係

図 2.3に基礎長さ $L=30\text{m}$ 、基礎幅を $W=10\text{m}$ 、基礎板厚を $H=1, 2, 4, 8, 16\text{m}$ と変化させた場合の伝達率について山原式の結果と比較して示す。ここでいう基礎板厚の変化は基礎の断面 2 次モーメントのみの増大を意味しており、基礎板厚が大きくなることによる深さ方向の地盤の拘束効果は考慮されない。基礎板厚が厚くなり断面 2 次モーメントが大きくなるにしたがい、本評価法の伝達率は山原式に近づいている様子が分かる。すなわち、本評価法が山原式と整合していることを示すと共に、基礎板厚が薄くなるにつれて(剛性が低下するにつれて)伝達率が増加することが分かる。



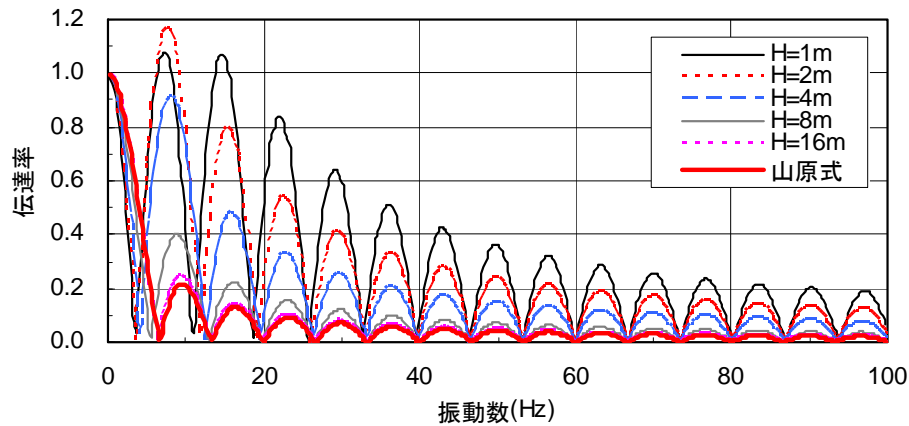


図 2.3 基礎板厚をパラメータとした伝達率

### 2.3.3 基礎幅と基礎の入力損失との関係

基礎の断面 2 次モーメントが基礎幅に比例するため、式(2-8)～式(2-10)に示される基礎バネも基礎幅に比例する。これに対して地盤バネは、等価基礎半径 $r$ に比例することから基礎長さを一定とすると、基礎幅の平方根に比例する。これらの結果、基礎幅の変化に対して伝達率が変化することになる。ここでは、伝達率に対する基礎幅の影響を確認するため、解析モデルの基礎長さ $L=30\text{m}$ 、基礎幅を $W=5, 10, 20, 50, 100, 200\text{m}$ 、基礎板厚を $H=2\text{m}$ とし、他のパラメータを(1)と同一条件として伝達率を計算した。図 2.4に計算された伝達率を示す。基礎幅が大きくなるにしたがい伝達率は小さくなる傾向が見られる。これは前述の理由から、基礎幅の増大により地盤バネに比べて基礎バネの剛性が相対的に大きくなったことに起因する。ただし、基礎の辺長比が過小または過大な場合には地盤バネの評価式(2-6)、式(2-7)の精度が低下するため、辺長比が過小または過大な基礎に対して簡易評価法を適用する場合には、地盤バネの設定方法に留意する必要がある。

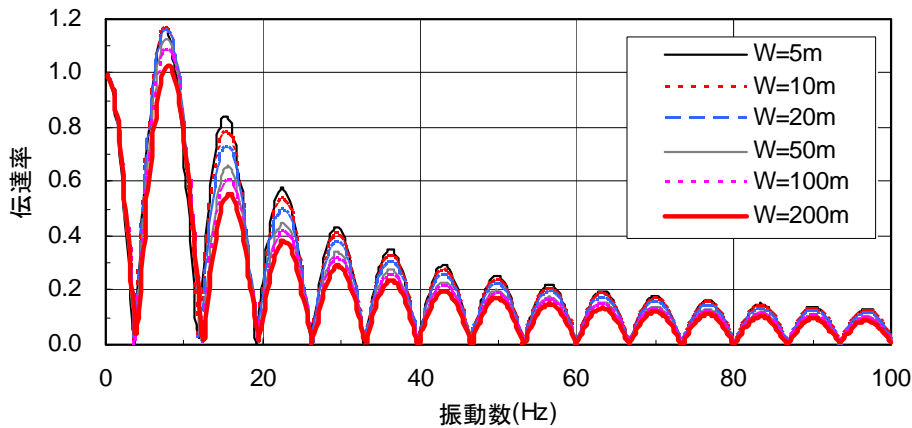


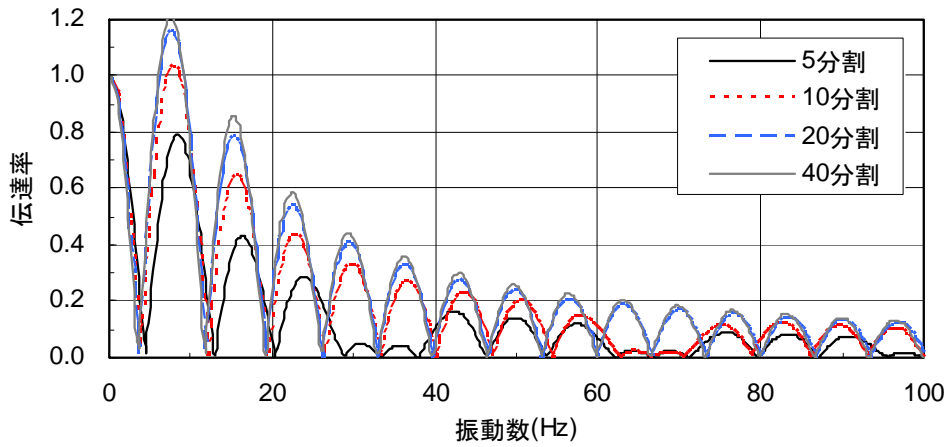
図 2.4 基礎幅をパラメータとした伝達率

#### 2.3.4 基礎の分割数と基礎の入力損失との関係

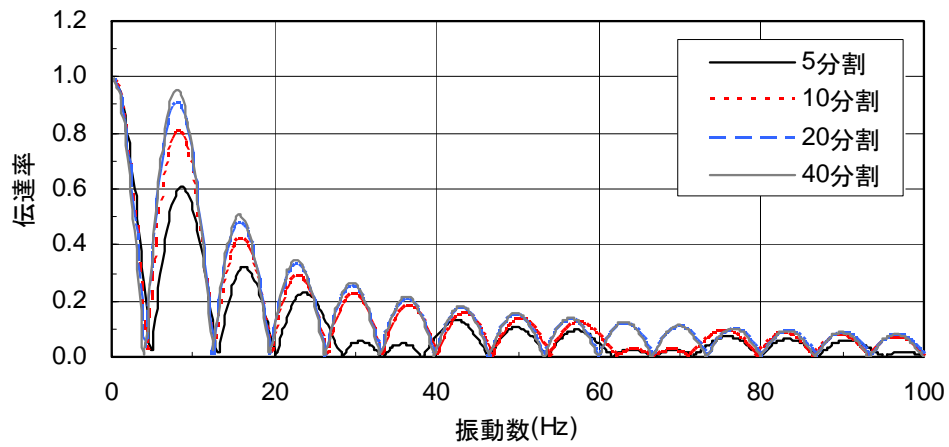
図 2.5 に基礎長さ  $L=30\text{m}$ 、基礎幅  $W=10\text{m}$ 、基礎板厚を  $H=2, 4, 16\text{m}$ 、基礎を 5, 10, 20, 40 等分割した場合の伝達率を示す。図 2.5 (a) に示す基礎板厚  $H=2\text{m}$  の場合は、基礎の分割数が多くなると伝達率は増加するが、分割数が多くなると伝達率の増加率は低くなる。すなわち、本解析の条件においては 20 等分程度で伝達率が安定的に計算されることが分かる。同様の傾向は図 2.5 (b) に示す基礎板厚  $H=4\text{m}$  の場合にも見られるが、分割数の増加にともなう伝達率の変化率は (a) より小さくなり、さらに図 2.5 (c) に示す基礎板厚  $H=16\text{m}$  の場合は分割数を変化させてもほぼ同一の伝達率となる。以上より、基礎の分割数を多くすることにより伝達率は一定値に収束することが分かったが、一方、分割数の増加は計算時間の増加にも関係することに留意する必要がある。

また、図 2.5 (a), (b) に示すように基礎板厚が大きい場合、分割数 5 では 35, 67Hz 付近に、分割数 10 では 67Hz 付近に伝達率の落ち込みが見られる。これらは、地盤変位が離散的に入力されていることによるエイリアシングの影響であり、分割された基礎長さおよび地盤のせん断波速度により伝達率が落ち込む振動数が異なる。分割された基礎長さが長いほど、すなわち分割数が少ないほど、またせん断波速度が遅いほど伝達率の落ち込み部分が顕著に見られる。

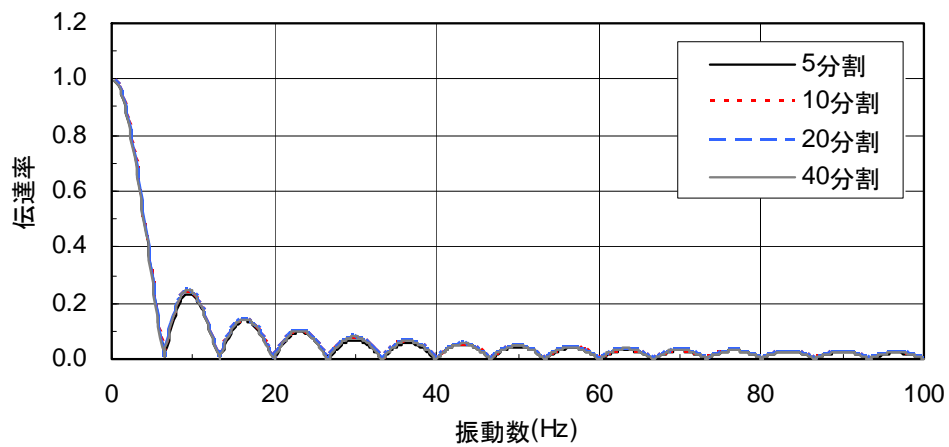
以上より、分割数を設定する場合は前述した基礎板厚のほかに、基礎長さや地盤のせん断波速度を確認する必要がある。しかし、長大な構造物ではない一般的な建物に対して伝達率を計算する場合、計算に用いるパラメータは本解析に用いたものと大きく異ならないと考えられるため、分割数が 20 程度あれば収斂した伝達率が計算されると考えられる。



(a) 基礎板厚  $H=2\text{m}$  の場合



(b) 基礎板厚  $H=4\text{m}$  の場合



(c) 基礎板厚  $H=16\text{m}$  の場合

図 2.5 基礎の分割数を変化させた場合の伝達率

### 2.3.5 入力変位の距離減衰と基礎の入力損失との関係

鉄道振動を対象として入力損失を評価する場合は、入力変位の距離減衰を考慮する必要がある。鉄道振動の距離減衰特性は種々の条件により異なるが、減衰を幾何減衰と内部減衰に分離した式(2-24)に示される Bronitz の式で回帰されることが多い（たとえば津野ほか(2005)など）。

$$u_R = u_0 e^{-\alpha(R-R_0)} \left( \frac{R}{R_0} \right)^{-n_B} \quad (2-24)$$

ここで、 $R, R_0$  はそれぞれ加振源から観測点、基準点までの距離、 $u_R, u_0$  はそれぞれ距離  $R$  の地点、基準点の変位振幅、 $\alpha, n_B$  はそれぞれ内部減衰、幾何減衰に関する定数である。

ここでは内部減衰を考慮せず( $\alpha=0$ )、表面波を仮定した幾何減衰のみを考慮する( $n_B=0.5$ )。基準点における入力変位の振幅( $u_0=1$ )に、式(2-24)により計算される基礎の各位置における $u_R/u_0$ を乗じたものを入力変位 $x_i$ の振幅とする。入力損失の計算方法の説明図を図 2.6に示す。パラメータは基礎長さ( $L=10, 30\text{m}$ )と基準点位置から基礎までの最短距離(以下、基準点距離： $z=1\sim 100\text{m}$ )とし、伝達率は基準点距離の地盤(図中(a))変位に対する同位置の基礎(図中(b))の応答変位の比とした。その他のパラメータは基礎板厚を $H=2\text{m}$ とし、それ以外は 2.3.2 項と同一条件とした。

図 2.7に計算結果を示す。伝達率は基準点距離が短くなると低振動数側で小さくなり高振動数側で大きくなる傾向が見られるが、伝達率の変化は顕著ではない。また、基礎長さに対する差異も大きくない。伝達率の差が小さい理由として、基準点距離が短くなると地盤変位が大きくなるものの、基礎端部の変位もほぼこれに比例して大きくなるため距離減衰の影響が顕著に現れなかったものと考えられる。

以下では、実測から得られた基礎の入力損失効果について本評価法の解析結果と比較することにより、本評価法の妥当性を検討する。

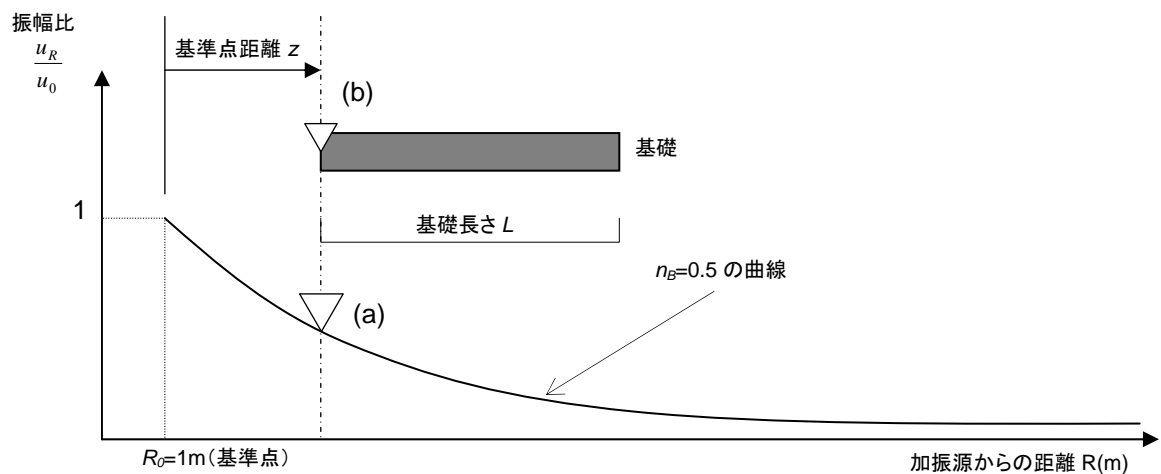
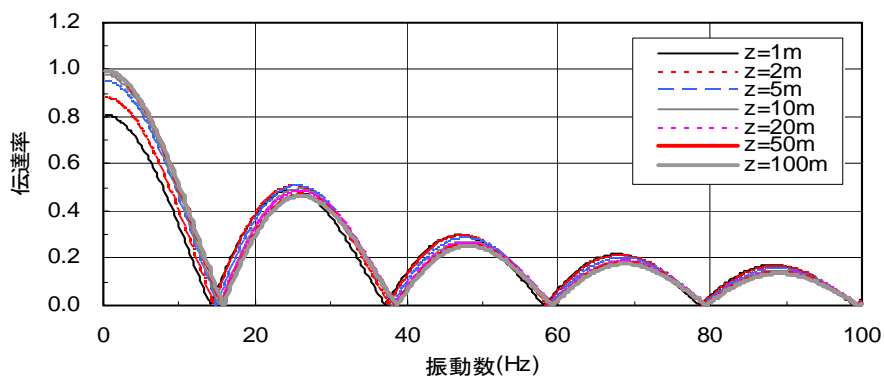
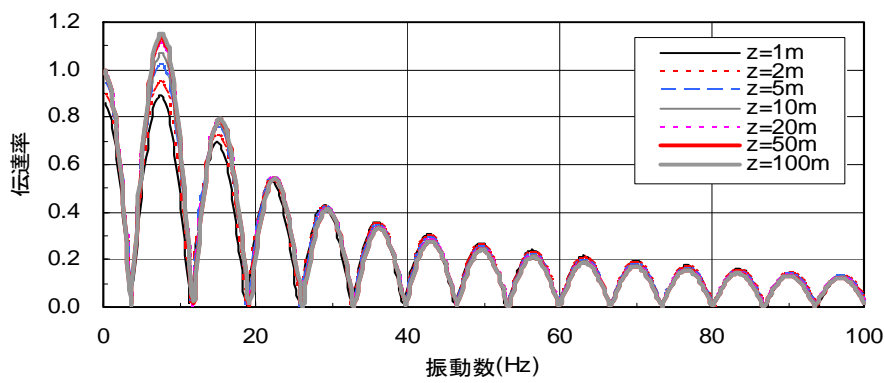


図 2.6 距離減衰を考慮した場合の計算方法の説明図



(a)基礎長さ  $L=10\text{m}$



(b)基礎長さ  $L=30\text{m}$

図 2.7 距離減衰を考慮した場合の伝達率

## 2.4 簡易評価法の実測結果への適用

### 2.4.1 実測した建物と測定概要

表 2.1に測定を行った3棟について、建物および鉄道軌道の概要を示す。3棟の建物ともRC造の集合住宅である。対象となる軌道は、建物Aおよび建物Bは地下軌道、建物Cは高架軌道である。以下に、3棟の建物と振動測定の概要について述べる。

表 2.1 測定した3棟の建物および鉄道軌道に関する概要

|             | 建物 A    | 建物 B               | 建物 C               |
|-------------|---------|--------------------|--------------------|
| 対象軌道        | 地下軌道    | 地下軌道               | 高架軌道               |
| 軌道と基礎との水平距離 | 0.0m    | 12.5m              | 25m                |
| 用途          | 集合住宅    | 集合住宅               | 集合住宅               |
| 階数          | 地上4階    | 地上13階<br>(免震ピットあり) | 地上20階<br>(免震ピットあり) |
| 構造種別        | RC造     | RC造                | RC造                |
| 構造形式        | 壁式      | 壁付ラーメン<br>(基礎免震)   | 壁付ラーメン<br>(基礎免震)   |
| 基礎形式        | 直接基礎    | 杭基礎<br>(杭長約20m)    | 直接基礎               |
| 基礎底位置       | GL-1.7m | GL-3.9m            | GL-4.9m            |
| 基礎梁成        | 1.6m    | 1.0m               | 2.2m               |

地下軌道と基礎との水平距離はトンネルの外構面からの水平最短距離、高架軌道については橋脚からの水平最短距離を表す。建物Aについては軌道の直上にあるため0.0mとした。

図 2.8に建物Aと地下鉄トンネルとの位置関係、および測定時のピックアップ配置を示す。基礎下端から深さ約3.3mの位置にトンネルの天端があり、建物は地下鉄軌道の直上にある。建物は平面が約10m×8.3mのL字形をした4階建てである。構造形式は壁式、基礎は直接基礎、基礎平面は約10m×9.8mである。固体音が問題になると予想されることから、その低減対策として基礎直下に厚さ50mmの防振用ゴムシートを基礎全面に敷いている。測定当時は上棟直後であり、各室には仕上げ、設備等がない状況であった。なお、建物Aは計画上、基礎梁を介して隣接する杭基礎の高層建物と繋がっている。測定には振動数範囲がDC～100Hzの1成分サーボ型加速度計(VM-5122:IMV(株製))を使用した。測定点は、地盤側が敷地境界線付近の縁石上、建物側が1階のコーナー部分とした。図 2.11(a)に測定システムを示す。

図 2.9に建物Bと地下鉄トンネルとの位置関係、および測定時のピックアップ配置を示す。建物から水平に約12.5m、路面から約4.2mの深さの位置にトンネルがある。トンネルは、高さ5.4m、幅8.65m、壁厚0.45mで2連の形状を有する。建物は平面が約18.0m×12.3mのほぼ長方形をした13階建てである。構造形式は基礎免震構法(天然ゴム系積層ゴム+鋼材ダンパー+鉛ダンパー)を採用した壁付ラーメン構造(桁行:ラーメン構造,張間:連層耐震壁構造)である。基礎は杭長約20mの杭基礎であり、基礎平面は約21.9m×14.9mである。測定には前述のサーボ型加速度計および測定振動数範囲がDC～100Hzのサーボ型速度計(SPC:株東京測振製)を用いた。測定点は、

地盤側が歩道上，建物側が免震階床の基礎梁直上の 6 箇所である。図 2.11(b)に測定システムを示す。

図 2.10に建物Cと高架軌道との位置関係，および測定時のピックアップ配置を示す。敷地境界線から最短で約 2.5m離れたところに高架軌道が存在する。高架軌道の橋脚は 1×1 スパンのRC造ラーメン式架構であり，長さ 8mの深礎杭 4 本で支持されている。建物基礎と最も近い高架軌道の橋脚との距離は約 25mである。建物は地上 20 階建てで，セットバックのないE型をした平面形状であり，構造形式は基礎免震構法(鉛プラグ入り積層ゴム（一部は直動転がり支承）)を採用した壁付ラーメン構造（桁行：ラーメン構造，張間：連層耐震壁構造）である。基礎は直接基礎であり，基礎平面は約 61.2m×39.0mである。測定には前述のサーボ型加速度計およびサーボ型速度計を用いた。測定点は，地盤側が敷地内道路上，建物側が免震階床の長辺方向の中央および両端に 2 箇所ずつの合計 6 箇所である。図 2.11(c)に測定システムを示す。

3 棟の建物の測定に共通して，測定方向は上下方向とし，加速度または速度波形をサンプリング周波数 1kHz，16bit A/D コンバータで収録した。また，サーボ型速度計で測定された波形については，高速 Fourier 変換を利用して微分することにより加速度波形に変換した。

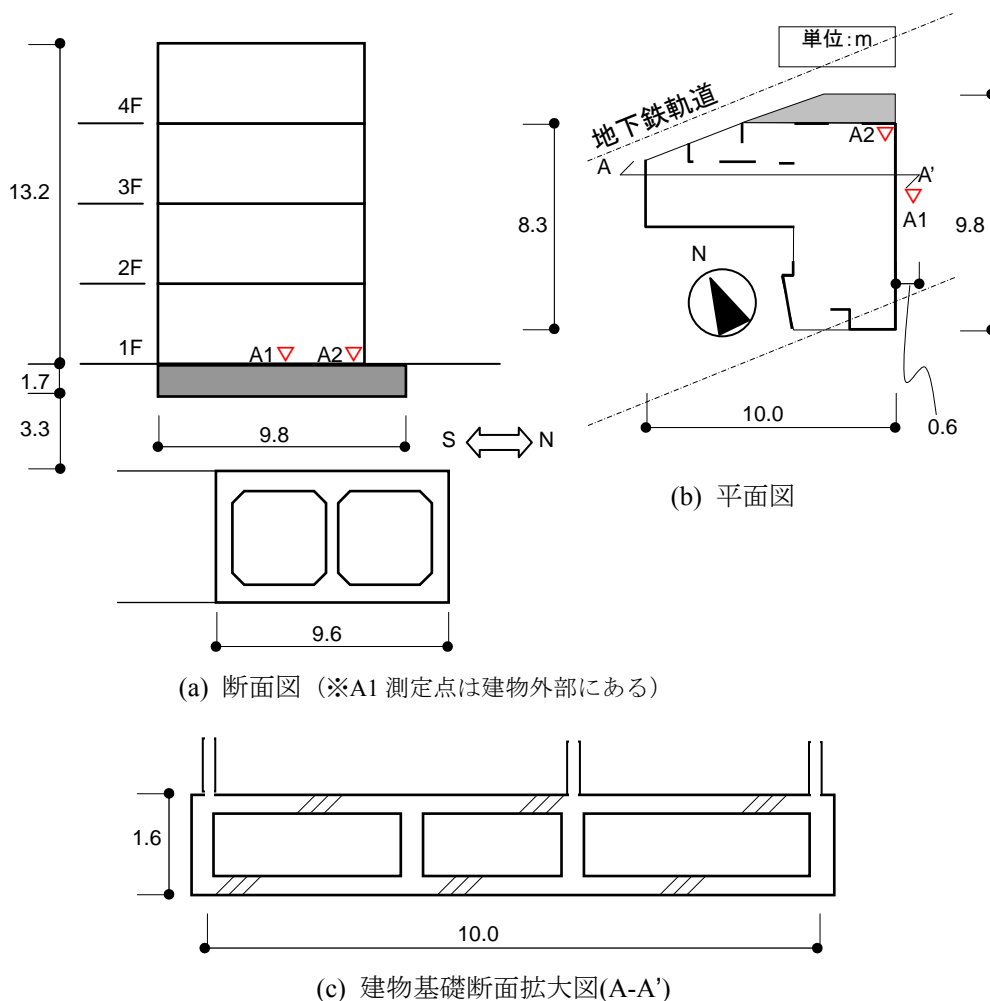


図 2.8 建物 A と軌道との関係図およびピックアップ配置図

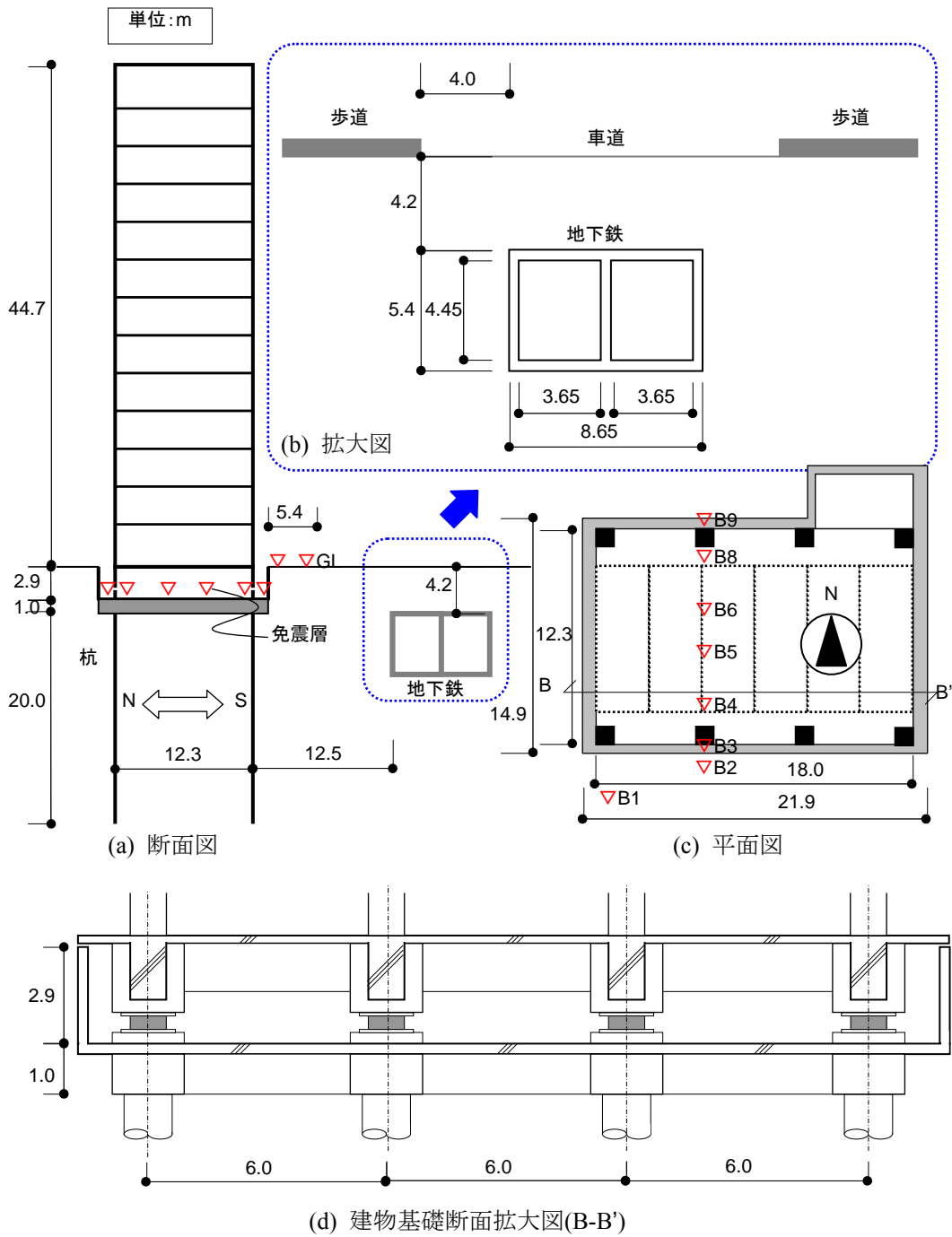
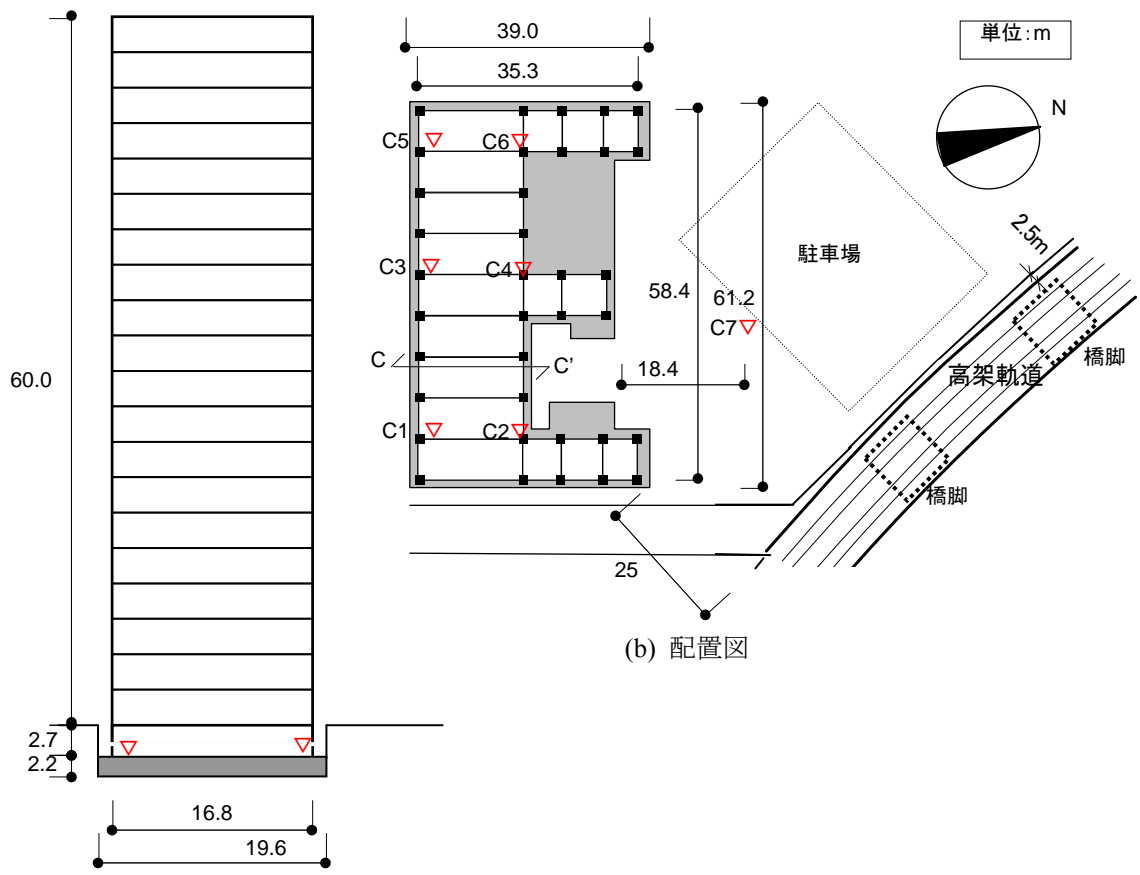


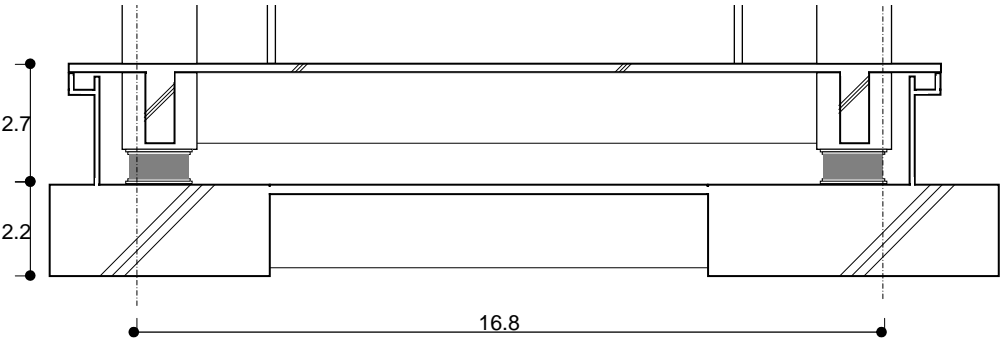
図 2.9 建物 B と軌道との関係図およびピックアップ配置図





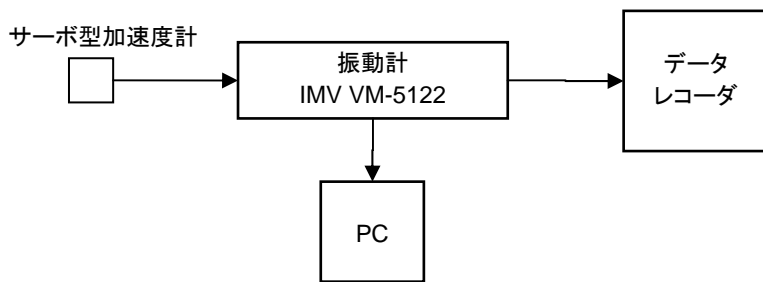
(b) 配置図

(a) 断面図

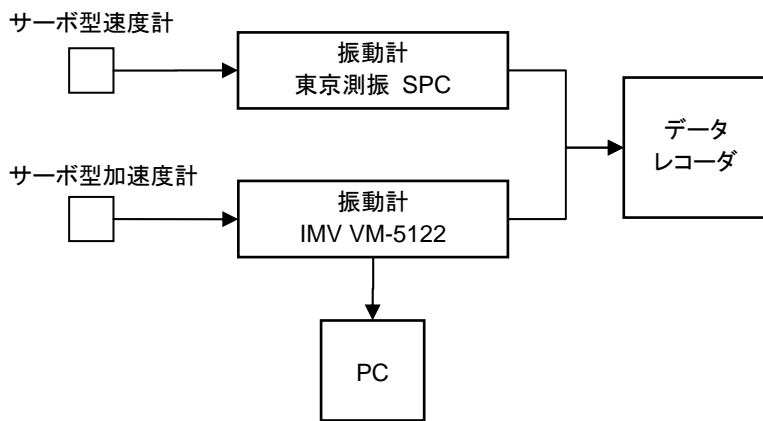


(c) 建物基礎断面拡大図(C-C')

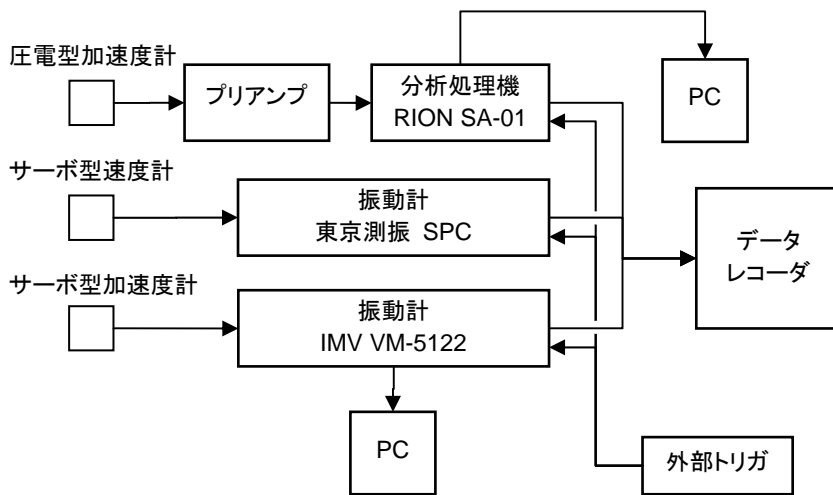
図 2.10 建物 C と軌道との関係図およびピックアップ配置図



(a) 建物 A における測定システム



(b) 建物 B における測定システム



(c) 建物 C における測定システム

図 2.11 建物 A, B, C における測定システム図

## 2.4.2 基礎に入力される地盤振動

山原式または簡易評価法を適用するにあたり、基礎に入力される地盤振動に関する見かけの位相速度を設定する必要がある。以下では、各建物の位相速度の設定方法について示す。

建物 A は地下鉄軌道直上にあるが、地盤振動の到来方向を推定するための振動測定を実施していない。そのため、地盤振動の到来方向および入射角は不明であるが、ここでは表層地盤のせん断波速度で水平進行波が到来するものと仮定する。せん断波速度は近隣地盤の PS 検層結果を基に推定し、地下鉄トンネルに上載されている地盤の各層のせん断波速度を各層厚で重み付き平均したものとする。

建物 B については、当該地盤の位相速度に関する澤田ほか(2005)や、深度の浅い地下鉄から発生する地盤振動特性に関する吉原ほか(1990)の実測的な研究などから Rayleigh 波が到来しているものと考えられる。また、これらの研究成果から Rayleigh 波の到来方向は南方向と推定される。Rayleigh 波の位相速度は固体音領域では表層地盤の表層付近のせん断波速度にほぼ等しくなることから、本検討では表層付近のコントラストの大きい地層境界から上層のせん断波速度を各層の層厚で重み付き平均した平均せん断波速度を位相速度とした。なお、せん断波速度は表面波探査法(SWS 法)から得られた推定値(大橋(2005))を用いた。

建物 C については、山岸ほか(2004)の当該建物に対する距離減衰に関する実測結果や、杭基礎を有する高架軌道から発生する地盤振動は成層地盤を反映した Rayleigh 波が伝播されるとする武宮(2004)の研究、さらに測定点が高架軌道の杭長の 3 倍以上離れた場所にあるため、十分発達した Rayleigh 波が到来しているものと推測される。建物 C の基礎底はせん断波速度 400m/s の地盤に埋め込まれており、基礎は主にこの地盤の影響を強く受けているものと考えられることから、せん断波速度 650m/s の層以浅のせん断波速度を各層の層厚で重み付き平均した平均せん断波速度を位相速度とした。せん断波速度は、地盤構成が当該地盤のものとほぼ同一とみなせる敷地から約 750m 離れた地点の PS 検層結果を用いた。

表 2.2 に建物 A, B および C の位相速度を設定するために用いたせん断波速度を含む地盤定数のプロフィールを示す。なお、建物 A の地盤については土質および深さを元に密度を推定した。また、図 2.12 にこれらの地盤定数から計算される Rayleigh 波の位相速度の分散曲線を示す。

表 2.2 位相速度の設定に用いた地盤定数

| (a) 建物 A   |         |                        |           | (b) 建物 B   |         |                        |           | (c) 建物 C   |         |                        |           |
|------------|---------|------------------------|-----------|------------|---------|------------------------|-----------|------------|---------|------------------------|-----------|
| 深度<br>GL-m | 層厚<br>m | 密度<br>t/m <sup>3</sup> | Vs<br>m/s | 深度<br>GL-m | 層厚<br>m | 密度<br>t/m <sup>3</sup> | Vs<br>m/s | 深度<br>GL-m | 層厚<br>m | 密度<br>t/m <sup>3</sup> | Vs<br>m/s |
| 1.4        | 1.4     | 1.5                    | 70        | 0.92       | 0.92    | 1.6                    | 175       | 1.7        | 1.7     | 1.6                    | 170       |
| 4.4        | 3.0     | 1.6                    | 170       | 1.94       | 1.02    | 1.7                    | 266       | 12.4       | 10.7    | 1.8                    | 400       |
| 5.0        | 0.6     | 1.7                    | 230       | 2.88       | 0.94    | 1.6                    | 118       | 18.8       | 6.4     | 1.8                    | 650       |
| 6.2        | 1.2     | 1.7                    | 230       | 5.62       | 2.74    | 1.7                    | 177       |            |         |                        |           |
| 12.2       | 6.0     | 1.7                    | 250       | 10.57      | 4.95    | 1.7                    | 254       |            |         |                        |           |
| -          | -       | 1.8                    | 360       | 18.03      | 7.46    | 1.8                    | 423       |            |         |                        |           |
|            |         |                        |           | -          | -       | 2.0                    | 850       |            |         |                        |           |

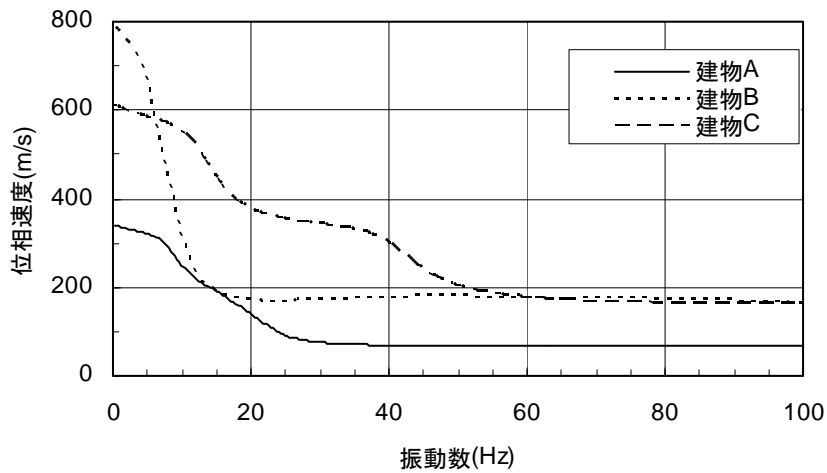


図 2.12 各地盤の Rayleigh 波位相速度(基本モード)

#### 2.4.3 実測による伝達率の評価方法

実測における基礎の伝達率は、地表に対する最下階床位置（免震の場合下部基礎）の Fourier スペクトル比で表現することとする。スペクトル比は地下鉄の通過時間を含む約 32 秒間を対象に加速度波形を Fourier 変換し、バンド幅 0.5Hz の Parzen ウィンドウによる平滑化処理後に比を求め、これらの結果が良好に観察されたものについて相加平均した。

#### 2.4.4 実測結果に対する慣性の相互作用効果および杭基礎の各影響の除去方法

##### (1) 実測結果に対する慣性の相互作用効果の影響の除去方法

2.4.3項で計算されるスペクトル比は慣性の相互作用効果(以下、IIE)が影響しているため、山原式および簡易評価法を実測結果と比較する上でIIEの影響を除去する必要がある。ただし、本実測結果等の情報からIIEを厳密に同定することは難しいため、建物の振動伝搬特性を模擬した等価な成

層地盤と支持地盤の2層地盤に対して、上下動の重複反射理論によりIIEを簡略的に推定した。等価な成層地盤とは、建物高さを層厚、建物全質量を建物体積で除したものを密度、等価な地盤の1次固有振動数が上部構造のそれと等しくなる速度をP波速度とし、上部構造の増幅率と等しくなるように減衰定数を設定した地盤をいう。

表 2.3にIIEの評価に使用したパラメータを示す。IIEは解放地盤に対する基礎底位置(等価な成層地盤と支持地盤との境界部)の伝達率により評価する。なお、建物Aについては基礎下に防振用ゴムシートを敷いているため、ゴムシート層を含む3層地盤として計算した。ゴムシートの物性はメーカー公表値としたが、P波速度についてはゴムシートを含む全体系振動数を実測結果に合わせるため、メーカー公表値の約3倍とした。また、地表測定点は建物に近い場所にあるため、ゴムシートを含む上部構造の振動の影響を受けている可能性がある。そこで、建物AのIIEとして、ゴムシートと地盤との境界位置(内部地盤)に対する基礎底位置の伝達率についても評価する。図 2.13にIIEの影響としての地盤に対する基礎底位置の伝達率を示す。上部構造の固有振動数付近でディップが生じている様子が分かる。

以下では、前述の計算方法により算定されたスペクトル比と、このスペクトル比を図 2.13の伝達率で除したものを実測による伝達率として示す。

## (2)杭基礎の影響の除去方法

また、建物Bは杭基礎であることから実測結果には杭の影響が含まれているため、実測結果と比較する際には山原式および簡易評価法の結果に杭の影響を考慮する必要がある。これについて、徳川(2006)は建物Bを対象に杭の有無による、自由地盤に対する基礎位置の伝達率の比(直接基礎/杭基礎)を有限要素法により計算している。図 2.14に計算された伝達率の比を示す。凹凸が見られるものの、ほとんどの振動数範囲で杭基礎より直接基礎の場合の方が伝達率は大きくなっている。本検討では、山原式および簡易評価法の結果をこの比で除すことにより杭基礎の影響を考慮した伝達率(理論値)を推定した。

表 2.3 IIE 評価用パラメータ

|                |       | 建物 A                   | 建物 B                   | 建物 C                   |
|----------------|-------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 上部構造<br>(等価地盤) | 建物高さ  | 13.2m                  | 44.7m                  | 60.0m                  |
|                | 密度    | 0.257 t/m <sup>3</sup> | 0.344 t/m <sup>3</sup> | 0.385 t/m <sup>3</sup> |
|                | P 波速度 | 2881 m/s               | 2145 m/s               | 2878m/s                |
|                | 減衰定数  | 0.075                  | 0.15                   | 0.10                   |
| 支持地盤           | 密度    | 1.7 t/m <sup>3</sup>   | 1.7 t/m <sup>3</sup>   | 1.8 t/m <sup>3</sup>   |
|                | P 波速度 | 1210m/s                | 1660m/s                | 1670m/s                |
|                | 減衰定数  | 0.02                   | 0.02                   | 0.02                   |
| IIE の評価        |       | 基礎底/解放地盤<br>基礎底/内部地盤   | 基礎底/解放地盤               |                        |

建物 A は等価地盤と支持地盤との間に層厚 0.05m、密度 1.2t/m<sup>3</sup>、P 波速度 301m/s のゴムシート層を挿入した 3 層地盤で計算した。

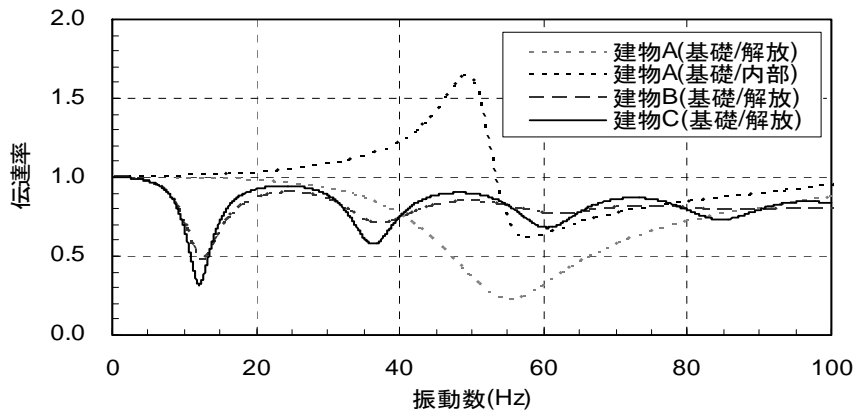


図 2.13 地盤に対する基礎底位置の伝達率

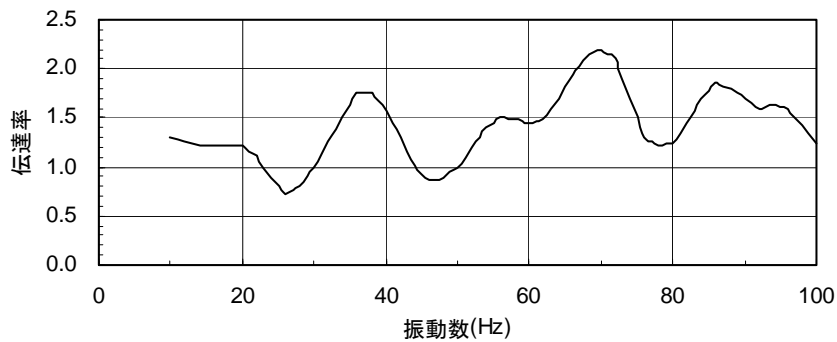


図 2.14 自由地盤に対する基礎位置の伝達率の比(直接基礎／杭基礎)

## 2.4.5 剛基礎を仮定した入力損失の理論式と実測結果との比較

### (1) 剛基礎仮定の入力損失理論式の算定条件

以上示した仮定に基づき、各建物の基礎に対して山原式を適用する。表 2.4に山原式の算定条件を示す。基礎長さ $L$ については以下とした。建物Aは基礎平面形状の長辺および短辺長さの 2 種類とした。建物Bは張間方向が軌道に対して直交しているため短辺長さを採用した。建物Cは軌道に対して斜めに位置しており、基礎長さを明確に決定できないため、長辺、短辺および対角線の各長さの 3 種類とした。また、せん断波速度 $\beta$ については2.4.2項で述べた平均せん断波速度として表 2.4に示す値を用いた。

表 2.4 山原式の算定条件

|                   | 建物 A                | 建物 B     | 建物 C                              |
|-------------------|---------------------|----------|-----------------------------------|
| 基礎長さ $L$          | 長辺：10.0m<br>短辺：9.8m | 短辺：14.9m | 長辺：61.2m<br>短辺：39.0m<br>対角線：72.4m |
| 地盤のせん断波速度 $\beta$ | 149 m/s             | 183 m/s  | 368 m/s                           |

(2) 実測結果と剛基礎仮定の入力損失理論式との比較

図 2.15に建物Aにおける地表に対する1階の伝達率の実測結果(IIIEの影響を除去した伝達率を含む。以下同じ。)および山原式の結果を示す。実測結果は約40~70Hzの振動数範囲を除けば概ね振動数が高くなるにしたがい小さくなる。実測結果を山原式と比較すると山原式では伝達率を過小に、すなわち入力損失を過大に評価することになる。

図 2.16に建物Bにおける地表に対する免震階床の伝達率(実測結果)および山原式の結果を示す。建物Bについては図 2.9に示すように、免震階床の基礎梁上の測線に沿って6箇所測定を行っているため、同図には各測定点の伝達率とその平均値(ただし、個々の伝達率についてはIIIEの影響を除去していない)を示している。各測定点の伝達率は10Hz付近でばらつきが大きいものの固体音に関係する数十Hz付近では6箇所とも同様の伝達率を示している。なお、伝達率について地下鉄軌道からの距離に対する明確な依存性は確認されなかった。各測定点の伝達率の平均値は振動数が高くなるにしたがい小さくなるが、70Hz付近から逆に大きくなる傾向が見られる。また、山原式は実測結果と比較して伝達率を過小に評価することになる。

図 2.17に建物Cにおける地表に対する免震階床の伝達率(実測結果)および山原式の結果を示す。建物Cについても図 2.10に示すように、免震階床の6箇所測定を行っているため、同図には各測定点のスペクトル比とその平均値(ただし、個々の伝達率についてはIIIEの影響を除去していない)を示している。ややばらつきはあるものの各測定点とも同様の傾向を示し、伝達率について高架軌道の柱脚からの距離に対する明確な依存性は確認されなかった。実測結果の伝達率は約80Hz以上で微増が見られるものの、概ね振動数の増加に伴い緩やかに小さくなる傾向が見られる。また、山原式による伝達率は実測結果と比較して、いずれの基礎長さに対しても過小評価となった。

以上、3棟の建物について実測結果と山原式との比較を行った。これらの結果、3棟の建物とも実測結果と山原式との整合性は良好でない。これらの理由として、建物Aのように建物直下に地下鉄軌道がある場合には、山原式の水平進行波の仮定を満たしていないこと、すなわち、下方からの直達実体波が影響しているものと考えられる。他方、建物Bおよび建物Cについては、表面波が到来していると考えられるが、これらの建物では基礎平面に対して基礎梁成が小さいため、基礎を剛体と看做すことが出来ないことが原因と推測される。

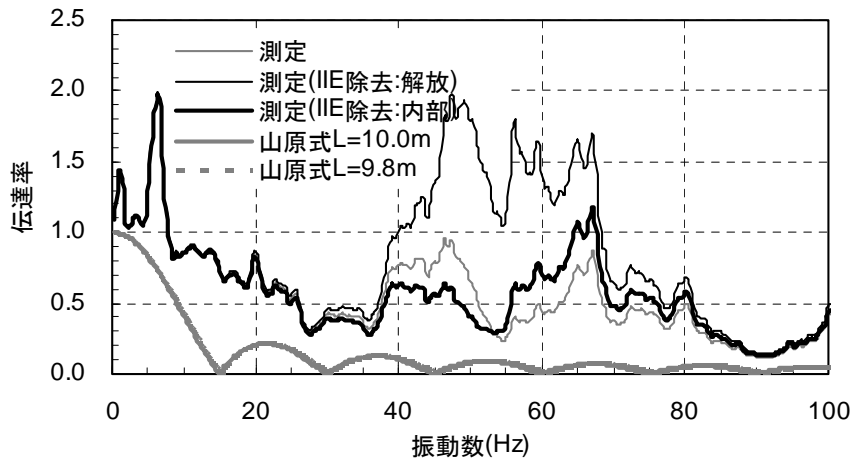


図 2.15 建物 A の実測による伝達率と山原式との関係

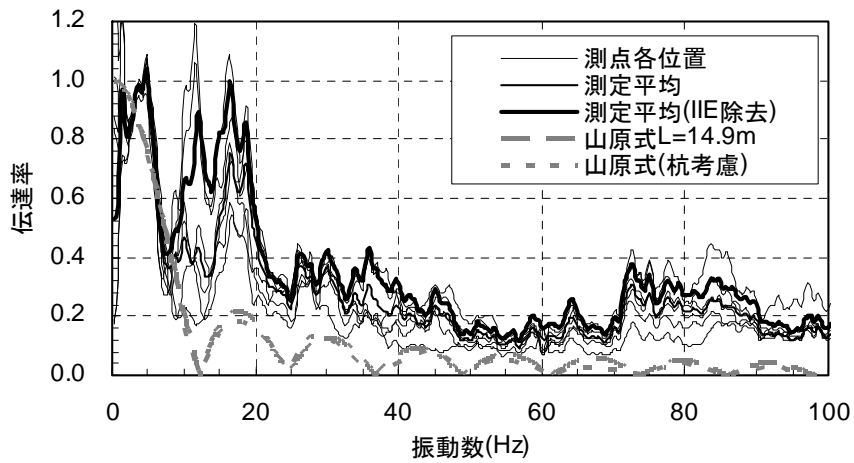


図 2.16 建物 B の実測による伝達率と山原式との関係

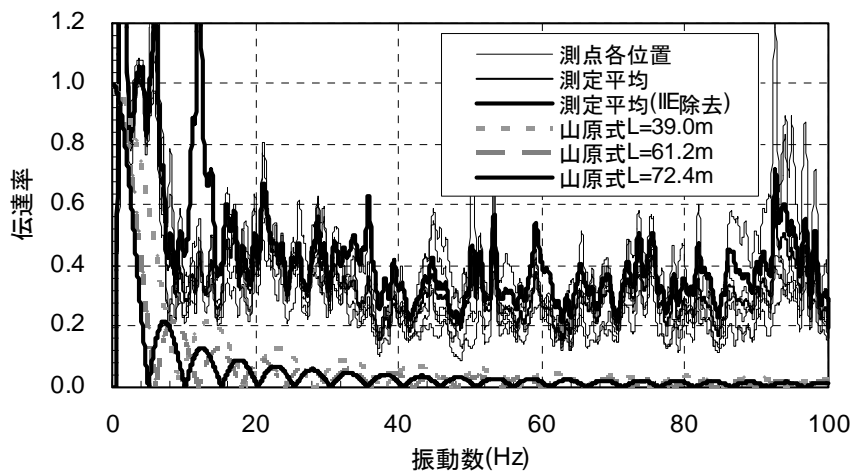


図 2.17 建物 C の実測による伝達率と山原式との関係



## 2.4.6 簡易評価法と実測結果との比較とその適用性

### (1)簡易評価法の算定条件

2.2 節に示した評価法を用いて、実測した 3 棟の建物の基礎の入力損失を評価する。算定にあたり基礎長さ $L$ は、建物Aが $L=10.0\text{m}$ (長辺方向)、建物Bが $L=14.9\text{m}$ (短辺方向)、建物Cが $L=61.2\text{m}$ (長辺方向)とした。地盤のせん断波速度 $\beta$ は表 2.4と同一とした。振動の入射角は、山原の仮定と同じ $90^\circ$ ，すなわち、水平進行波とした。

表 2.5 簡易評価法の算定条件

| パラメータ             | 建物 A                 | 建物 B               | 建物 C               |
|-------------------|----------------------|--------------------|--------------------|
| Young 率 $E$       | 21kN/mm <sup>2</sup> |                    |                    |
| 断面 2 次モーメント $I$   | 0.64 m <sup>4</sup>  | 2.2 m <sup>4</sup> | 11.9m <sup>4</sup> |
| 基礎分割数 $n$         | 20                   |                    |                    |
| Poisson 比 $\nu$   | 0.45                 |                    |                    |
| 地盤の密度 $\rho$      | 1.7t/m <sup>3</sup>  |                    |                    |
| 地盤のせん断波速度 $\beta$ | 149m/s               | 183 m/s            | 368 m/s            |

簡易評価法は、基礎についてはYoung率 $E$ 、断面 2 次モーメント $I$ 、基礎分割数 $n$ 、地盤についてはPoisson比 $\nu$ 、密度 $\rho$ 、地盤のせん断波速度 $\beta$ がパラメータとなる。このうちYoung率 $E$ 、分割数 $n$ 、Poisson比 $\nu$ 、密度 $\rho$ については3棟の建物とも表 2.5に示すように共通の値とした。断面 2 次モーメント $I$ については山原式における基礎長さ方向に直交する基礎部材の断面仕様から算定した。なお、特に建物Aおよび建物Cの基礎形状は複雑であるが、建物Aについては建物東側妻面における基礎形状から、建物Cについては平面的にくびれている部分の基礎形状から、それぞれ断面 2 次モーメントを計算した。免震構造である建物B、Cについては擁壁の断面 2 次モーメントも考慮している。

### (2) 簡易評価法と実測結果および山原式との比較

図 2.18～図 2.20に3棟の建物の実測結果（IIEの影響を除去した伝達率を含む。以下同じ。）を、簡易評価法による伝達率および山原式による結果と比較して示す。なお、建物Bおよび建物Cの実測結果は、それぞれ6箇所の測定点の平均値とした。実測結果と比較すると、建物Aでは簡易評価法の伝達率は山原式より若干大きくなるものの、実測結果との整合性は低く、基礎剛性の考慮の有無では説明がつかない。他方、建物B、Cでは両者の伝達率の傾向は若干異なっているものの、約 60Hz以上および一部の振動数を除く振動数範囲において、簡易評価法の伝達率は山原式の伝達率に比べて実測結果と比較的整合している。

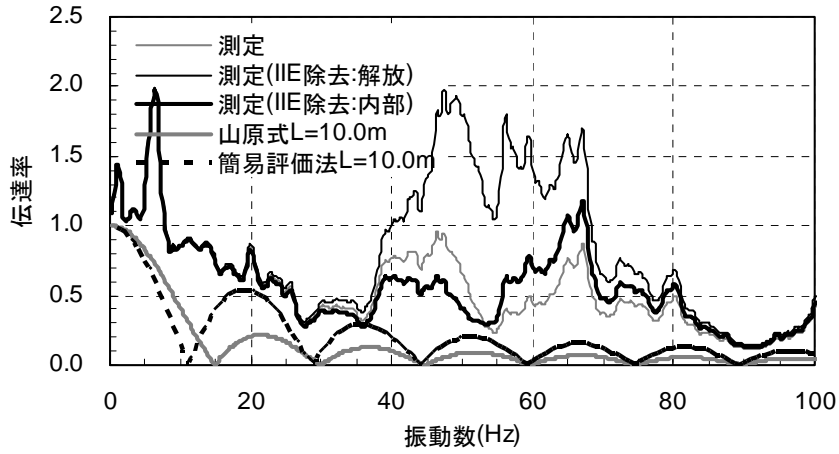


図 2.18 簡易評価法による基礎の伝達率と実測との比較(建物 A)

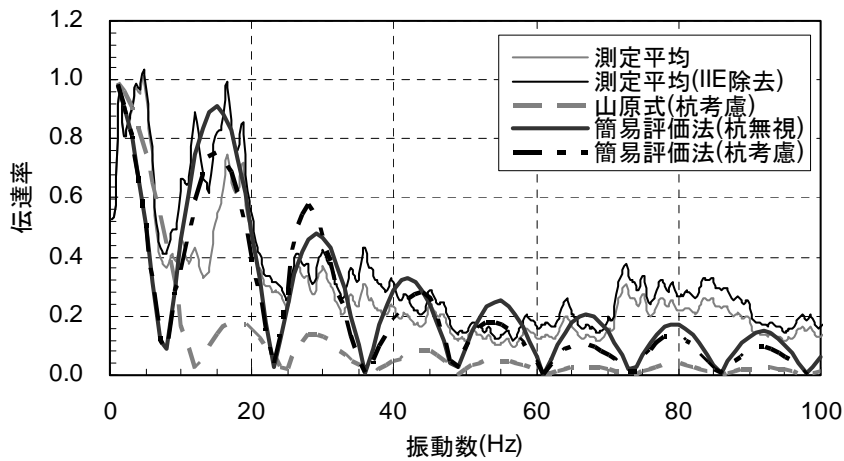


図 2.19 簡易評価法による基礎の伝達率と実測との比較(建物 B)

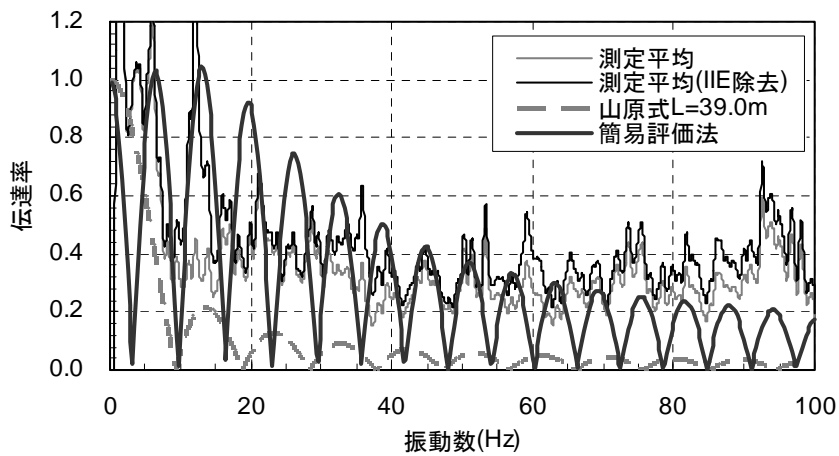


図 2.20 簡易評価法による基礎の伝達率と実測との比較(建物 C)

以上、3棟の建物について実測結果と山原式および簡易評価法による伝達率との比較を行った。この結果、地下鉄軌道直上に位置する建物 A については、山原式および簡易評価法による伝達率はともに実測結果と整合しなかった。これは、基礎に対する入力機構が本検討の仮定と異なっていることが原因と考えられる。このような条件において入力損失を評価する場合には、基礎に対する入力機構を適切に評価することが重要であると考えられる。他方、建物 B、C については、一部の振動数範囲を除くと簡易評価法は山原式に比べて実測結果と比較的整合している。基礎の入力損失を評価する場合に基礎剛性が大きく影響しているためと推測される。すなわち、長大な基礎の入力損失の評価にあたっては、剛基礎仮定の山原式をそのまま適用した場合は入力損失を過大に評価するため、柔基礎として評価することが重要であると考えられる。

また、評価精度を確保すると同時に評価時間の短縮も大きな課題であることは既に述べた。基礎の入力損失特性を評価する時間は、計算の与条件を整理する時間と演算時間の和となる。これまで述べてきたように簡易評価法に必要なパラメータは、地盤については弾性波速度、密度、Poisson 比、基礎については基礎形状（長さ、幅）、Young 率、断面 2 次モーメントである。これらのパラメータについては、既往の地盤調査や基本計画図などから設定または推定することができるため、計算の与条件を整理する時間を短くできると考える。また、簡易評価法の計算には既存の表計算ソフトを使用しているが、演算時間は極めて短い。したがって、評価時間の短縮に関する課題については簡易評価法により解決できると考える。

さらに、建物と地盤の相互作用に関する特性を正確に評価するためには IIE を適切に評価する必要がある。また、IIE を精度よく評価するためには、地盤の Dynamic Ground Compliance や上部構造の振動特性を評価する必要がある。上部構造の振動特性については次章で述べる方法により評価することは可能であると考えられる。しかし、Dynamic Ground Compliance については既往の研究によれば数 Hz 程度までは評価が可能であると考えられるが、本論文で対象としている固体音領域における評価は現時点では困難であると考えられる。

なお、実測結果に見られる高振動数範囲での伝達率の増加は山原式および簡易評価法では説明することができない。これは、地表および基礎位置での測定結果に他の部位の振動やノイズが影響している可能性がある。また、測定結果と簡易評価法との比較において、杭基礎の影響や地表測定点の自由地盤仮定の成立性についても課題が残されている。これらの評価や課題については今後の検討課題としたい。

## 2.5 剛基礎と柔基礎の入力損失の差異の定量的評価

本評価法と山原式との評価結果の差およびその傾向について、パラメータスタディを行う。表 2.6 に解析パラメータを示す。解析対象とする基礎は図 2.2 に示すような RC 造の基礎幅  $W=10\text{m}$  の長方形基礎であり、パラメータは、基礎板厚  $H$ 、基礎長さ  $L$  および地盤のせん断波速度  $\beta$  である。2.3 節に示したように距離減衰の影響が小さいことから、ここでは山原式と同一条件である減衰のない水平進行波を仮定した。

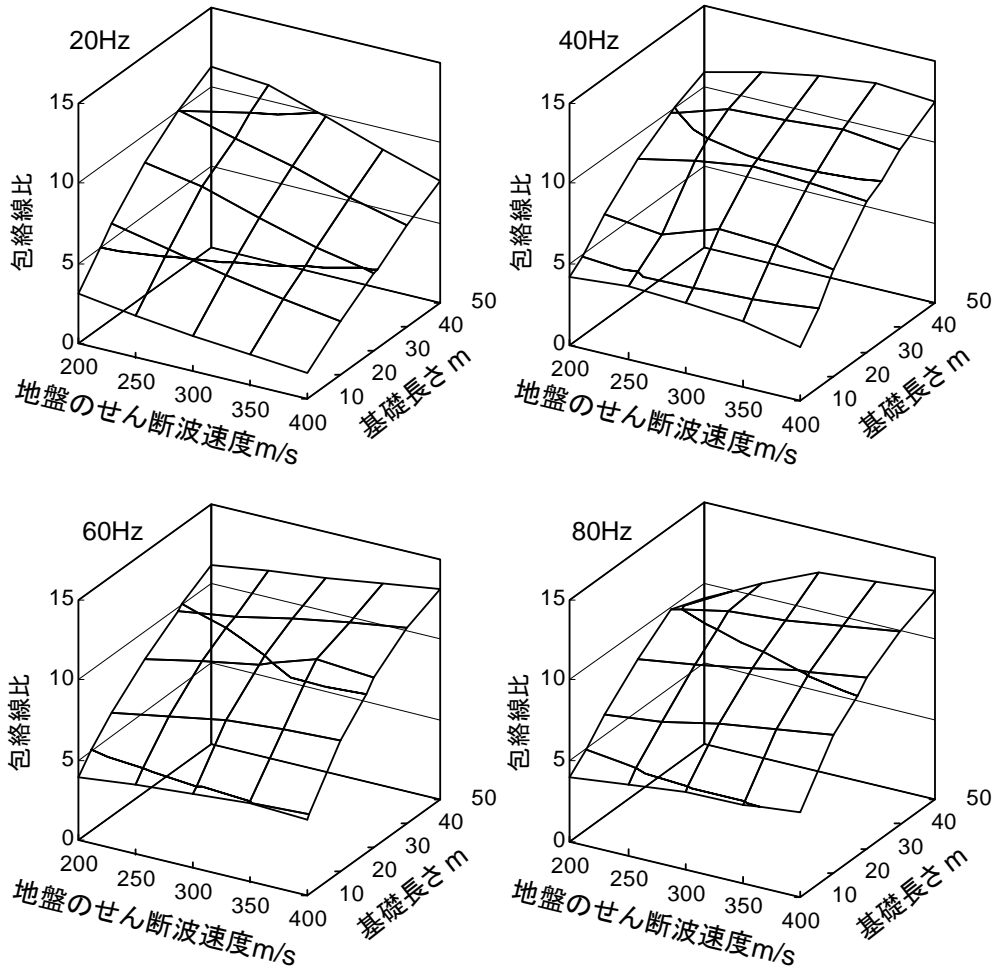
表 2.6 解析パラメータ

| パラメータ             | 値                           |
|-------------------|-----------------------------|
| 基礎板厚 $H$          | 1.0, 2.0 m                  |
| 基礎長さ $L$          | 10, 20, 30, 40, 50 m        |
| 地盤のせん断波速度 $\beta$ | 200, 250, 300, 350, 400 m/s |

Young 率  $E=21\text{kN/mm}^2$ 、基礎分割数  $n=20$ 、Poisson 比  $\nu=0.45$ 、地盤の密度  $\rho=1.7\text{t/m}^3$

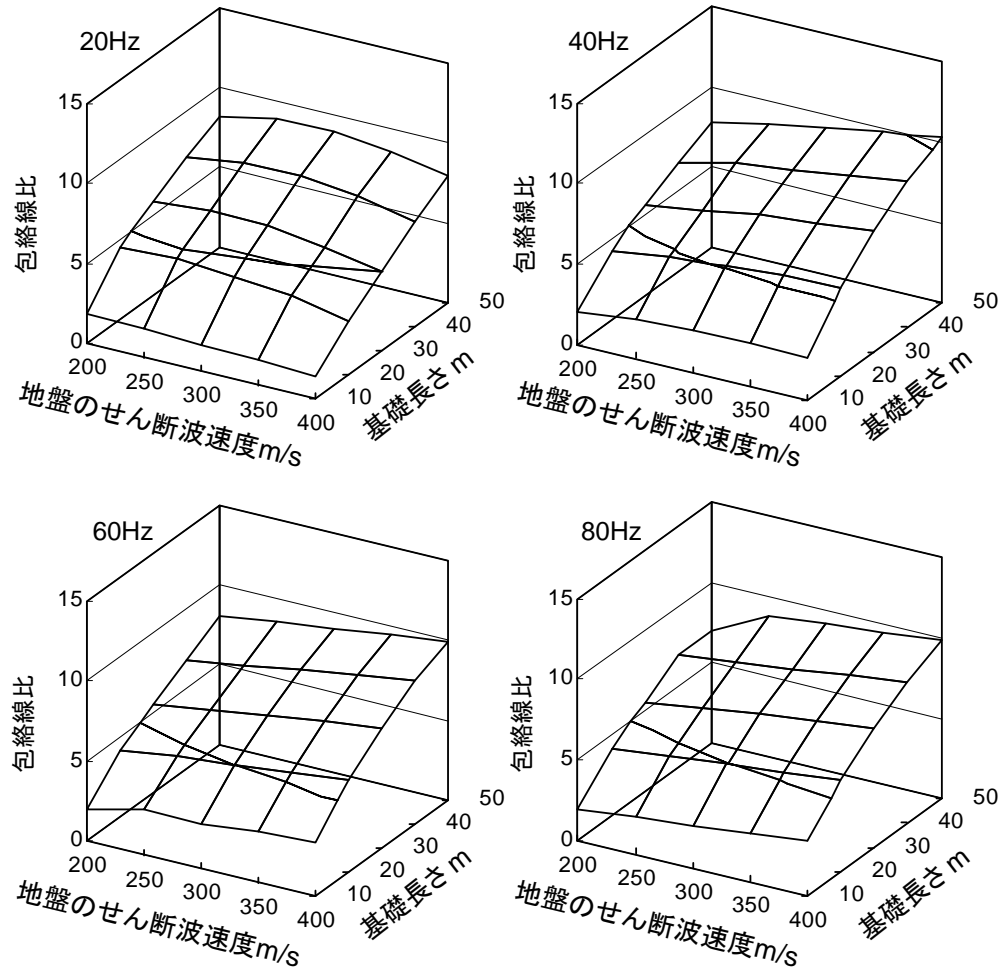
図 2.21 に各基礎板厚について、振動数が 20, 40, 60, 80Hz における山原式に対する本評価法の伝達率の比を示す。ここでいう比とは両者の伝達率の包絡線の比（以下、包絡線比）を表している。基礎板厚  $H=1\text{m}$ （図 2.21(a)）の方が  $H=2\text{m}$ （図 2.21(b)）と比較して包絡線比が大きくなる。すなわち、基礎剛性の低い方が剛基礎仮定に基づく山原式との差異が大きくなる。また、基礎長さが長くなるにしたがい包絡線比が顕著に大きくなる。一方、せん断波速度が大きくなるにしたがい、振動数が 40, 60, 80Hz においては包絡線比も大きくなるが、その変化の程度は基礎長さに対するものよりも小さい。なお、振動数が 20Hz においては、せん断波速度に対する包絡線比の傾向が他の振動数の傾向と異なっている。これは図 2.3 に見られるように、高振動数領域では伝達率の包絡線が単調に減少するが、低振動数領域では基礎剛性に応じて複雑に変化することに起因する。

以上述べたように、柔基礎では剛基礎と比較して伝達率が大きくなり、言い換えれば入力損失効果が小さくなることが分かった。本検討範囲においては包絡線比が 10 (20dB) 以上となる場合も見られた。したがって、基礎長さが長く、基礎剛性の低い基礎に対して入力損失を検討する場合には、基礎の剛性を考慮して評価することが重要であると考えらる。



(a)基礎板厚  $H=1\text{m}$

図 2.21 山原式に対する本評価法の伝達率の比(包絡線比)



(b)基礎板厚  $H=2\text{m}$

図 2.21 山原式に対する本評価法の伝達率の比(包絡線比) continued.

## 2.6 結び

本章では、固体音領域における基礎の入力損失特性を簡易に評価できる手法の確立を目的に、柔基礎の入力損失に関する簡易評価法の提案、3棟の建物の実測結果と山原式および簡易評価法との比較、および剛基礎と柔基礎による入力損失の評価差の把握を行った。

実測結果との比較では、建物が鉄道軌道の直上にない建物2棟について、簡易評価法による評価結果は剛基礎を仮定した山原式と比較して実測結果との整合性が高い。しかし、地下鉄軌道の直上にある建物については、両評価法とも伝達率を過小評価している。これは入力変位が水平進行波の仮定を満たしていないことが原因であると考えられる。基礎の入力損失特性の評価に際して、直達実体波を含む基礎への入力機構の適切な評価が重要であることが分かった。

また、基礎板厚、地盤のせん断波速度、基礎長さをパラメータとした柔基礎に対する入力損失特性について検討した結果、基礎板厚が薄くなるにしたがい、また基礎長さが長くなるにしたがい、剛基礎に基づく山原式による評価結果との差異が大きくなることが分かった。また、40Hz以上の高振動数領域では、地盤のせん断波速度が大きくなるにしたがいその差異もやや大きくなることが分かった。

以上から、固体音領域において基礎の入力損失効果を評価する場合には、基礎長さや基礎板厚に応じて基礎の剛性を考慮することが重要であると同時に、基礎への入力機構の適切な評価が重要であることが分かった。本章で提案した簡易評価法の定式化において、基礎を単一な平板として扱っている。今後は、上部構造や杭基礎の影響を考慮できるように改良を行う必要がある。また、さらに実測結果を蓄積して、本評価法の妥当性の確認とさらなる改良を行っていく必要があると考える。

## 参考文献（第2章）

- 大橋哲朗 (2005): 地下鉄走行に伴う振動の地盤・構造物への伝達特性に関する研究, 名古屋大学大学院工学研究科地圏環境工学専攻修士論文
- 澤田義博, 大橋哲朗, 山岸邦彰, 野路利幸 (2005): 地下鉄走行に伴う振動の地盤・構造物への伝達特性について, 物理探査学会第112回学術講演会論文集, pp.12-15
- 武宮宏和 (2004): 高架軌道からの新幹線列車振動の地盤内伝播性状, 鉄道力学論文集, 第8号, pp.53-58
- 津野究, 古田勝, 藤井光治郎, 長嶋文雄, 日下部治 (2005): 地下鉄シールドトンネルから伝播する広帯域振動の減衰特性, 土木学会論文集, No.792/III-71, pp.185-197
- 徳川孝信 (2006): 地下鉄の走行に伴う振動・騒音の評価と対策, 名古屋大学大学院工学研究科地圏環境工学専攻修士論文
- 山岸邦彰, 野路利幸, 山中久幸, 岩本毅, 原田浩之, 嶋田泰 (2004): 鉄道軌道に近接する免震建物の振動伝搬特性(その1)地盤における振動伝搬特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.257-258
- 山岸邦彰, 野路利幸, 谷垣正治, 岩本毅, 原田浩之 (2007): 地下鉄振動を受ける基礎の入力損失の簡易評価法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.327-328
- 山原浩 (1969): 地震時の地動と地震波の入力損失 (第1報), 日本建築学会論文報告集, 第165号, pp.61-66
- 吉原醇一, 中村充, 安井譲, 縄岡好人, 平野滋 (1990): 地下鉄振動の伝播性状に関する研究 (その1) - 地盤の振動伝搬性状について -, 大林組技術研究所報, No.42, pp.27-36



## 第3章

### 建物内の振動伝搬特性に関する簡易評価法の提案と

### その適用

---

### 3.1 まえがき

本章では、多質点系モデルを用いた建物内の振動伝搬特性に関する簡易評価法の提案とその適用について論じる。

固体音を予測する上で、前章に示した基礎の入力損失特性の評価と同様に、建物内の振動伝搬特性を適切に評価することも必要である。建物内の振動伝搬特性を評価する方法が大きく5分類されることについては既に述べた。本論文で対象とする固体音領域では、建物の固有モードの影響が大きく、評価精度を向上させるためには振動を現象的に捉える必要がある。5分類された方法の中で振動を現象的に扱うことのできる方法は、波動理論による方法、多質点系モデルによる方法、有限要素法による方法に限られる。しかし、実用性が高く、本論文の主旨の一つである評価精度の確保と評価時間の短縮の両立を図ることのできる方法は多質点系モデルによる方法である。多質点系モデルによる方法は、地震動に対する建物の動的挙動を把握する目的で既に多くの研究開発がなされ、汎用の計算ソフトウェアが市販されるなど、広く普及している。しかし、多質点系モデルを用いて固体音を予測する研究や事例は少ない。特に、スラブやバルコニー等の部材に対する質点系モデルへの置換や計算に必要なパラメータの設定が困難であるために、同法が普及されていないものと考えられる。本章に示す簡易評価法は、これらの課題の解決を図るために提案されるものである。提案する簡易評価法は、平板の振動理論に基づきスラブを質点系モデルへ置換することにより、建物の構造部材をすべて多質点系モデルとして構築することができ、モデル化に必要な手続きおよび解析時間を大幅に低減することができることを特徴とする。

3.2 節では、はじめに簡易評価法の計算の流れについて述べ、続いてスラブのモデル化から最終的に上部構造の伝達率を評価するまでの5段階の方法について述べる。

また、簡易評価法の妥当性を確認するために、理論式または実測による結果と比較をして、同法の適用性や適用限界などを確認する必要がある。3.3 節では、簡易評価法の実用化を図る目的から、実存する建物に対する実測結果との比較により同法の妥当性を確認する。はじめに3棟の建物で実施した振動測定の概要および結果について述べ、次にこれらの実測結果と本評価方法による計算結果とを比較し、簡易評価法の妥当性を確認するとともに考察について述べる。

3.4 節では、結びとして第3章のまとめを記す。

## 3.2 多質点系モデルを用いた上部構造の伝達率の評価法の提案

### 3.2.1 計算の流れ

これまで行ってきた振動測定およびその数値シミュレーションの結果から、上部構造の上下方向の伝達特性は各階質量と鉛直支持部材の鉛直剛性から求まる固有モードの影響を受けるだけでなく、上下振動が支配的なスラブ、バルコニーおよび廊下等（本章では、これらをまとめてスラブと呼ぶ）の振動の影響も強く受けていることが分かった。本章では、多質点系モデルを用いて、このようなスラブの振動特性を考慮に入れた上部構造の伝達率の評価方法を示す。ここでいう上部構造の伝達率とは、建物の柱際または壁際位置における最下階に対する各階の絶対加速度の Fourier 振幅比をいう。対象とする振動成分は固体音の発生に対して影響の大きい上下方向成分とする。

簡易評価法の計算フローを図 3.1に示す。以下ではこの計算フローの各項目の詳細について示す。

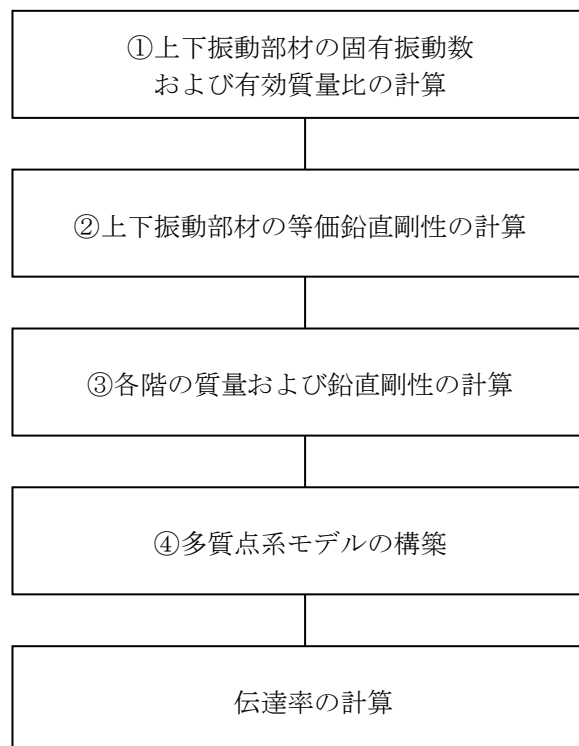


図 3.1 簡易評価法の計算フロー

### 3.2.2 多質点系モデルを用いた上部構造の伝達率の評価法

#### (1) 上下振動部材の固有振動数および有効質量比の計算法

居住部のスラブ（周辺梁を含む）や廊下等のように上下振動が支配的な部材をここでは上下振動部材と呼ぶことにする。ただし、上下振動部材には柱および壁等の鉛直支持部材は含まれない。上下振動部材としてはこの他に、二重床や天井、キッチンカウンター等建築躯体ではない部位もあるが、ここではこれらの部材の中で質量が大きいスラブのみを対象とする。

一般的に、スラブの固有振動数および有効質量比を精度よく計算するためには、スラブの形状、スラブ厚、大梁・小梁、荷重等の諸条件を詳細に考慮できる FEM により評価することが有効であるが、計算時間が長いことや FEM を適用するためのスキルが必要であることから汎用性が高いとは言えない。また、固体音の予測が求められる事業企画段階では、詳細な設計情報がないこと、評価に多くの時間を費やせないこと、等の制約がある。そこで、スラブを矩形の梁付きスラブとして扱うことが現実的である。矩形の梁付きスラブの固有振動数の計算方法は、高島ほかの一連の研究（流田・高島(1996)、岡富ほか(1996)、山岸ほか(1997)）によって示されている。本論文では、スラブの固有振動数の算定に高島ほかの方法を用いる。

植松ほか(1997)の研究から RC 造スラブの減衰定数は 0.02~0.06 程度であり、減衰がスラブの振動数の変化に与える影響は小さいと考えられるため、振動方程式における減衰項を無視した場合のスラブの自由振動に関する振動方程式は式(3-1)のように示される（APPENDIX.1）。

$$m_0 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + D_0 \left( \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} \right) = 0 \quad (3-1)$$

ここで、 $m_0$  は単位面積当たりのスラブの質量、 $w$  はたわみを表す。

$D_0$  はスラブの曲げ剛性であり、 $E$  を Young 率、 $h_0$  をスラブ厚さ、 $\nu$  を Poisson 比とすると、 $D_0$  は式(3-2)で表現される。

$$D_0 = \frac{Eh_0^3}{12(1-\nu^2)} \quad (3-2)$$

たわみ  $w$  を、空間項と時間項とに変数分離し、さらに空間項を級数展開して式(3-3)のように表現することができる。

$$w(x, y, t) = \left[ \sum_m \sum_n w_{mn} f_{mn}(x, y) \right] e^{i\alpha t} \quad (3-3)$$

ここに  $w_{mn}$  は係数、 $f_{mn}(x, y)$  は、 $x$  方向  $m$  次、 $y$  方向  $n$  次（以下、 $mn$  次）の形状関数である。 $f_{mn}(x, y)$  は、近似的に式(3-4)で表現される。

$$f_{mn}(x, y) = f_m(x) f_n(y) \quad (3-4)$$

ここで、 $f_m(x), f_n(y)$  はそれぞれ式(3-5), (3-6)で表現される (APPENDIX.2)。

$$f_m(x) = q_{1m}(\cos k_m x + \cosh k_m x) + q_{2m}(\cos k_m x - \cosh k_m x) \\ + q_{3m}(\sin k_m x + \sinh k_m x) + q_{4m}(\sin k_m x - \sinh k_m x) \quad (3-5)$$

$$f_n(y) = q_{1n}(\cos k_n y + \cosh k_n y) + q_{2n}(\cos k_n y - \cosh k_n y) \\ + q_{3n}(\sin k_n y + \sinh k_n y) + q_{4n}(\sin k_n y - \sinh k_n y) \quad (3-6)$$

ここに、 $q_{1m}, q_{1n}$  等は周辺梁の境界条件により求まる係数である。式(3-3)を式(3-1)に代入すると Galerkin 式(3-7)が得られる。

$$\delta w_{mn} : \sum_m \sum_n w_{mn} [A_{\overline{m\overline{n}mn}} - \lambda_{mn}^2 B_{\overline{m\overline{n}mn}}] = 0 \quad (3-7)$$

ここで、 $\omega_{mn}$  をスラブの  $mn$  次固有角振動数とすると、 $A_{\overline{m\overline{n}mn}}, B_{\overline{m\overline{n}mn}}, \lambda_{mn}^2$  はそれぞれ式(3-8)～(3-10)で表される。

$$A_{\overline{m\overline{n}mn}} = \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \left( \frac{\partial^4 f_{mn}}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 f_{mn}}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4 f_{mn}}{\partial x^2 \partial y^2} \right) f_{\overline{mn}} dx dy \quad (3-8)$$

$$B_{\overline{m\overline{n}mn}} = \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} f_{mn} f_{\overline{mn}} dx dy \quad (3-9)$$

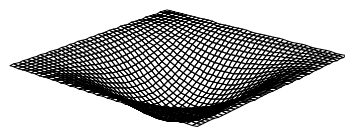
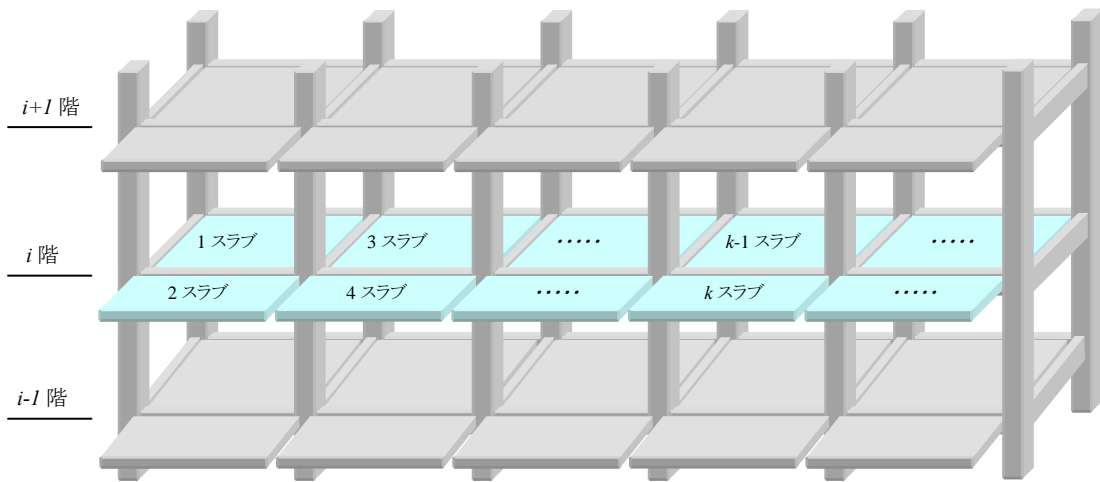
$$\lambda_{mn}^2 = \frac{\omega_{mn}^2 m_0}{D_0} \quad (3-10)$$

式(3-7)中の  $A_{\overline{m\overline{n}mn}} - \lambda_{mn}^2 B_{\overline{m\overline{n}mn}}$  が 0 となるように収束演算を行うと、スラブの固有角振動数  $\omega_{mn}$  が求まり、固有モードは近似的に  $f_{mn}$  で表現される。

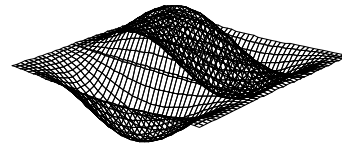
以上の解法により、任意の建物の一般階  $i$  階において第  $k$  スラブの  $mn$  次モードの有効質量比 ( $k$  スラブの全質量に対する有効質量の比)  $Rem_{ikmn}$  は、式(3-11)より求められる。

$$Rem_{ikmn} = \frac{\left\{ \int_0^{l_{ikx}} \int_0^{l_{iky}} f_{ikmn}(x, y) dx dy \right\}^2}{l_{ikx} l_{iky} \int_0^{l_{ikx}} \int_0^{l_{iky}} \{f_{ikmn}(x, y)\}^2 dx dy} \quad (3-11)$$

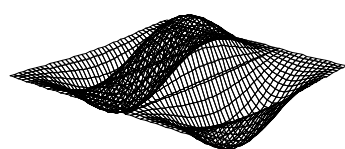
ここに、 $l_{ikx}$ ,  $l_{iky}$  はそれぞれ  $i$  階  $k$  スラブの  $x$ ,  $y$  方向長さ、 $f_{ikmn}(x, y)$  は  $i$  階  $k$  スラブの  $mn$  次形状関数を表す。本章では、 $i$  階の  $k$  スラブの  $mn$  次モードの固有角振動数  $\omega_{ikmn}$  と有効質量比  $Rem_{ikmn}$  は解析対象振動数の範囲、すなわち固体音が問題となる 100Hz (628 rad/s) までを対象とする。また、少なくともスラブの 1 方向が偶数次モードとなる場合については、有効質量比がほぼ 0 となるので、有効質量比  $Rem_{ikmn}$  を無視することにする。



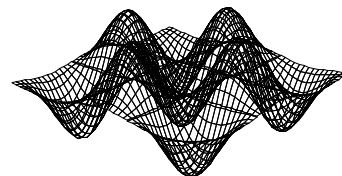
(a) スラブの 11 次モード



(b) スラブの 13 次モード



(c) スラブの 31 次モード



(d) スラブの 33 次モード

図 3.2 サフィックスの意味

## (2) 上下振動部材の等価鉛直剛性の計算法

(1)で計算された  $i$  階  $k$  スラブ  $mn$  次モードの固有角振動数  $\omega_{ikmn}$  と有効質量比  $Rem_{ikmn}$  を用いて、バネマスによる多質点系モデルを構築する。 $i$  階  $k$  スラブの全質量を  $Ms_{ik}$  とすると、 $i$  階  $k$  スラブ  $mn$  次モードの等価鉛直剛性  $ks_{ikmn}$  は式(3-12)で表現することができる。

$$ks_{ikmn} = Ms_{ik} \cdot Rem_{ikmn} \cdot \omega_{ikmn}^2 \quad (3-12)$$

## (3) 各階の質量および鉛直剛性の計算法

一般的な建物の地震応答解析におけるモデル化の方法と同様に、図 3.3に示すような建物の断面を考え、各階床に集中質点を配置する。集中質点の質量  $m_i$  は、各階の階高の中心間で囲まれた部分の躯体およびその他の部位の全質量  $m_{all,i}$ 、2.1 節で計算される有効質量比  $Rem_{ikmn}$  を利用して式(3-13)により算定される。

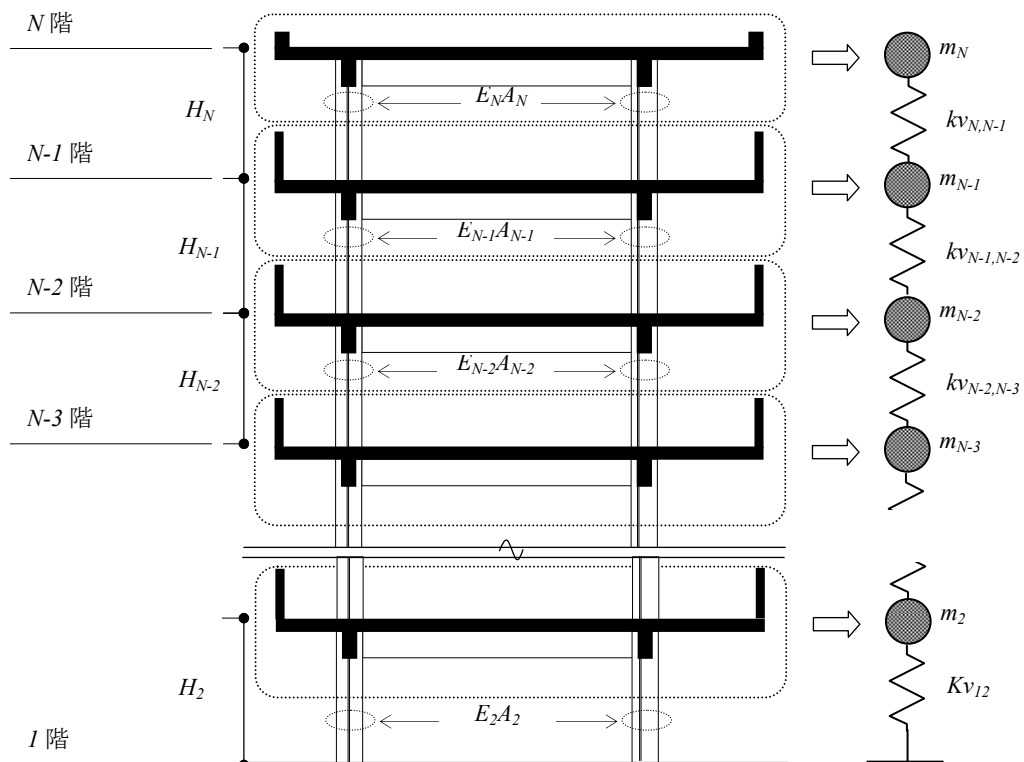


図 3.3 集中質点および鉛直剛性の考え方

$$m_i = m_{alli} - \sum_k^{N_{si}} Ms_{ik} \sum_m^{N_{ikm}} \sum_n^{N_{ikn}} Rem_{ikmn} \quad (3-13)$$

$$m = \{1,3,5,\dots\}, \quad n = \{1,3,5,\dots\}$$

ここに、 $N_{si}$ は*i*階の計算対象とするスラブ総数、 $N_{ikm}$ および $N_{ikn}$ は*k*スラブの*x*および*y*方向の計算対象とすべき最高次モード次数である。なお、前述の理由から*m, n*は奇数であり、以降に示す数式においても同様とする。*i*階、*i-1*階間の鉛直剛性 $kv_{i,i-1}$ は、階高 $H_i$ 、鉛直支持部材の断面積 $A_i$ および部材のYoung率 $E_i$ から式(3-14)で計算される。

$$kv_{i,i-1} = \frac{E_i A_i}{H_i} \quad (3-14)$$

#### (4) 多質点系モデルの構築法

図 3.4に多質点系モデルの一般階におけるモデル図を示す。ここでは最下階床に対する上層階床の伝達率を評価するために、最下階床を固定としたモデルとする。*i*階の集中質点（質量 $m_i$ ）に対して、(1)項および(2)項で算定された各スラブの各次等価鉛直バネを介して対応する各次等価質量が接続されている。図 3.4より、質点*i*における力の釣合い式は式(3-15)となる。

$$\begin{aligned} m_i \ddot{y}_i + \sum_j^N c_{ij} \dot{y}_i + \sum_k^{N_{si}} \sum_m^{N_{ikm}} \sum_n^{N_{ikn}} (\dot{y}_i - \dot{y}_{ikmn}) c_{ikmn} + (y_i - y_{i-1}) kv_{i,i-1} \\ + (y_i - y_{i+1}) kv_{i+1,i} + \sum_k^{N_{si}} \sum_m^{N_{ikm}} \sum_n^{N_{ikn}} (y_i - y_{ikmn}) ks_{ikmn} = -m_i \ddot{x}_0 \end{aligned} \quad (3-15)$$

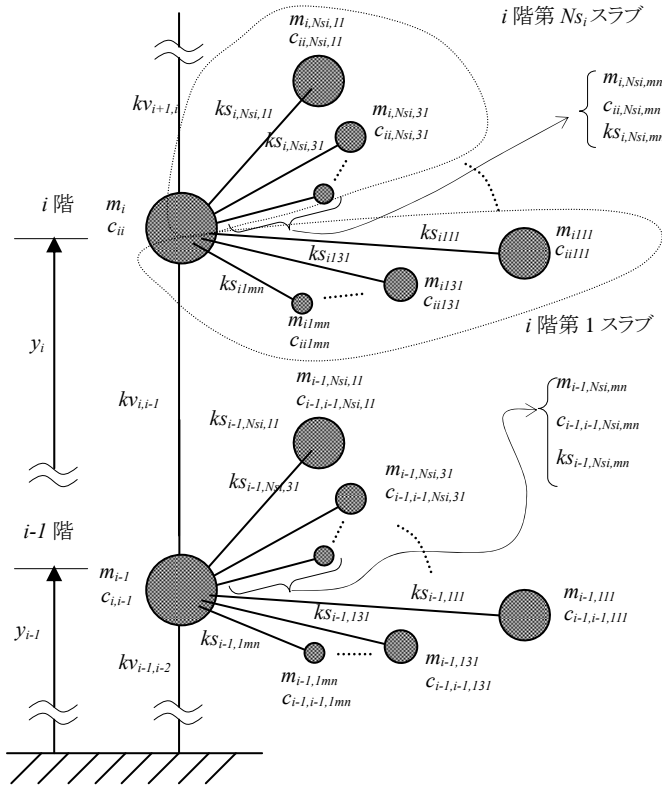
ここに、 $y_i, y_{ikmn}$ は質点*i*および $ikmn$ の相対変位、変数上部のドット・は時間に関する1階微分、 $\ddot{\cdot}$ は同2階微分、 $\ddot{x}_0$ は最下階の絶対加速度、他の変数については図 3.4を参照されたい。

また、質点 $ikmn$ における力の釣合い式は式(3-16)となる。なお、質点系に置換されたスラブを以下ではスラブ振動系と呼ぶ。

$$m_{ikmn} \ddot{y}_{ikmn} + (\dot{y}_{ikmn} - \dot{y}_i) c_{ikmn} + (y_{ikmn} - y_i) ks_{ikmn} = -m_{ikmn} \ddot{x}_0 \quad (3-16)$$

相対変位 $y_i, y_{ikmn}$ および最下階絶対加速度 $\ddot{x}_0$ のFourier変換表示を $Y_i, Y_{ikmn}$ および $\ddot{x}_0$ すると、式(3-15),(3-16)はそれぞれ式(3-17),(3-18)となる。





記号の説明

- $y_i$  : 質点  $i$  の相対変位
- $m_i$  : 質点  $i$  の質量
- $m_{ikmn}$  :  $i$  階  $k$  スラブ  $mn$  次有効質量(= $M_{s_{ik}} \cdot R_{em_{ikmn}}$ )
- $c_{ij}$  : 質点  $j$  の相対速度が質点  $i$  に影響を及ぼす減衰係数
- $c_{iikmn}$  :  $i$  階  $k$  スラブ  $mn$  次スラブ振動系の減衰係数
- $kv_i$  :  $i$  階と  $i-1$  階を結ぶ鉛直バネ定数
- $ks_{ikmn}$  :  $i$  階  $k$  スラブ  $mn$  次スラブ振動系の等価鉛直バネ定数

図 3.4 多質点系モデルの一般階におけるモデル図

$$-m_i \omega^2 Y_i + i \omega \left\{ \sum_j^N \left( c_{ij} + \delta_{ij} \sum_k^{N_{s_i}} \sum_m^{N_{ikm}} \sum_n^{N_{ikn}} c_{iikmn} \right) Y_j \right\} + \left( kv_{i,i-1} + kv_{i+1,i} + \sum_k^{N_{s_i}} \sum_m^{N_{ikm}} \sum_n^{N_{ikn}} ks_{ikmn} \right) Y_i \quad (3-17)$$

$$- (kv_{i,i-1} Y_{i-1} + kv_{i+1,i} Y_{i+1}) - \sum_k^{N_{s_i}} \sum_m^{N_{ikm}} \sum_n^{N_{ikn}} (ks_{ikmn} + i \omega c_{iikmn}) Y_{ikmn} = -m_i \ddot{X}_0$$

$$-m_{ikmn} \omega^2 Y_{ikmn} + i \omega (Y_{ikmn} - Y_i) c_{iikmn} + (Y_{ikmn} - Y_i) ks_{ikmn} = -m_{ikmn} \ddot{X}_0 \quad (3-18)$$

ここに、 $\delta_{ij}$  は Kronecker のデルタである。

式(3-18)から  $Y_{ikmn}$  は式(3-19)のように求められる。

$$Y_{ikmn} = \frac{(ks_{ikmn} + i \omega c_{iikmn}) Y_i - m_{ikmn} \ddot{X}_0}{-m_{ikmn} \omega^2 + i \omega c_{iikmn} + ks_{ikmn}} \quad (3-19)$$

式(3-19)を式(3-17)へ代入すると、式(3-17)は各階質点  $i$  の相対変位  $Y_i \{i=1,2,\dots,N\}$  のみで表現される。すなわち、仮に各階のスラブ数と計算対象モード次数を同一とすると全質点数は  $N \times N_{s_i} \times N_{ikm} \times N_{ikn} (=N N_{s_i} N_{ikm} N_{ikn})$  となり、一般的には  $N N_{s_{ik}} N_{ikm} N_{ikn} \times N N_{s_{ik}} N_{ikm} N_{ikn}$  のマトリクスを計算す

る必要があるが、式(3-17)を利用すると、 $N \times N$ のマトリクス計算で済むため計算時間を大幅に短縮することができる。

式(3-17)をマトリクスで表現すると式(3-20)となる。

$$(-\omega^2 \mathbf{M} + i\omega \mathbf{C} + \mathbf{K}) \mathbf{Y} = \mathbf{B} \ddot{X}_0 \quad (3-20)$$

ここに、

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & m_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & m_N \end{bmatrix} \quad (3-21)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} + \sum_k \sum_m \sum_n c_{11kmn} & c_{12} & \cdots & c_{1N} \\ c_{21} & c_{22} + \sum_k \sum_m \sum_n c_{22kmn} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{N1} & \cdots & c_{N,N-1} & c_{NN} + \sum_k \sum_m \sum_n c_{NNkmn} \end{bmatrix} \quad (3-22)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} kv_1 + \sum_k \sum_m \sum_n ks_{1kmn} - \sum_k \sum_m \sum_n \frac{ks_{1kmn}^2}{Q_{1kmn}} & -kv_1 & 0 & \cdots & 0 \\ -kv_1 & \cdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & -kv_{N-1} & kv_{N-1} + kv_N + \sum_k \sum_m \sum_n ks_{Nkmn} - \sum_k \sum_m \sum_n \frac{ks_{Nkmn}^2}{Q_{Nkmn}} \end{bmatrix} \quad (3-23)$$

$$\text{ここに、 } Q_{ikmn} = -m_{ikmn} \omega^2 + i\omega c_{ikmn} + ks_{ikmn} \quad (3-24)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -m_1 - \sum_k^{Ns_1} \sum_m^{N_{1kn}} \sum_n^{N_{1kn}} \frac{m_{1kmn} k s_{1kmn}}{Q_{1kmn}} \\ -m_2 - \sum_k^{Ns_2} \sum_m^{N_{2kn}} \sum_n^{N_{2kn}} \frac{m_{2kmn} k s_{2kmn}}{Q_{2kmn}} \\ \vdots \\ -m_N - \sum_k^{Ns_N} \sum_m^{N_{Nkn}} \sum_n^{N_{Nkn}} \frac{m_{Nkmn} k s_{Nkmn}}{Q_{Nkmn}} \end{bmatrix} \quad (3-25)$$

$$\mathbf{Y}^T = \{Y_1 \quad Y_2 \quad \dots \quad Y_N\} \quad (3-26)$$

また、減衰マトリクス  $\mathbf{C}$  の要素は、式(3-27)と式(3-28)の合成による。ここで式(3-27)は上下振動部材を除く上部構造系の減衰係数  $c_{ij}$  で、比例減衰系と仮定した非減衰固有ベクトルおよび各次モード減衰定数をもとに算定される(柴田(1981))。式(3-28)は  $i$  階  $k$  スラブ  $mn$  次モードの減衰係数  $c_{ikmn}$  で、減衰マトリクスの対角項に対してのみ与えられることになる。

$$c_{ij} = \sum_{p=1}^N \frac{2_p h_p \omega_{ip} m_{jp} u_{ip} u_j}{p M} \quad (3-27)$$

$$c_{ikmn} = 2 h_{ikmn} \omega_{ikmn} m_{ikmn} \quad (3-28)$$

ここに、 $h_{ikmn}$  および  $\omega_{ikmn}$  は  $i$  階  $k$  スラブの  $mn$  次モードの減衰定数および固有角振動数、 ${}_p h$ 、 ${}_p \omega$  はスラブ振動系を除いた上部構造系の  $p$  次モード減衰定数および  $p$  次固有角振動数、 ${}_p u_i$ 、 ${}_p u_j$  はそれぞれ  $p$  次固有ベクトルの  $i, j$  階の値、 ${}_p M$  は  $p$  次の一般化質量である。

式(3-20)から各階の相対変位ベクトル  $\mathbf{Y}$  は式(3-29)で求められる。

$$\mathbf{Y} = [-\omega^2 \mathbf{M} + i\omega \mathbf{C} + \mathbf{K}]^{-1} \mathbf{B} \ddot{X}_0 \quad (3-29)$$

##### (5) 伝達率の計算法

式(3-29)から求まる各階の相対変位  $Y_i$  と最下階の絶対加速度  $\ddot{X}_0$  から、 $i$  階の上部構造の伝達率  $T_{Bi}$  は式(3-30)で表現される。

$$T_{Bi} = \frac{-\omega^2 Y_i + \ddot{X}_0}{\ddot{X}_0} \quad (3-30)$$

また，最下階絶対加速度  $\dot{x}_0$  を 1 に基準化し，伝達率  $T_{Bi}$  を絶対値で表現すると，伝達率の絶対値は最終的に式(3-31)となる。

$$T_{Bi} = \left| -\omega^2 Y_i + 1 \right| \quad (3-31)$$

### 3.3 簡易評価法の実測結果への適用

#### 3.3.1 実測した建物と測定概要

式(3-31)から得られる上部構造の伝達率を、建物A, D, Eの3棟の建物の振動測定結果から得られる伝達率と比較して簡易評価法の妥当性を検証する。表 3.1に測定を行った3棟の建物の概要を示す。

建物Aに関する建物概要および測定システムについては第2章で述べたが、ピックアップの配置が異なっているため、図 3.6にピックアップの配置図を示す。ピックアップは屋上階を除く全階の入隅部に設置した。

図 3.6に建物Dと地下鉄トンネルとの位置関係、およびピックアップの配置を示す。建物Dから0.9m離れた場所に地下鉄トンネルがある。建物Dは14階建の高層集合住宅で、約11.6m×19.0mのほぼ整形な平面形状をなしている。構造種別はRC造、構造形式はラーメン、基礎は杭基礎(支持杭)である。建物Dも固体音の低減対策として基礎直下に厚さ50mmの防振用の発泡プラスチック系シートを全面に敷いている。また、建物Dは基礎梁を介して建物Aと繋がっている。振動測定は竣工直前の状況で実施した。測定には周波数範囲がDC～100 Hzの1成分加速度計(株)ミットヨ製)を使用した。ピックアップは一般階ではスラブ振動の影響の少ない柱際、屋上階では柱直上の屋根仕上げ面上に設置した。図 3.7に建物Dの測定システム図を示す。データ処理についてはサンプリング周波数を500Hzとした以外は建物Aの処理条件と同一である。

図 3.8に建物Eと地下鉄トンネルとの位置関係およびピックアップの配置図を示す。なお、建物と地下鉄に関する図面を入手することができなかつたため、図中の寸法は実測等による推定値である。建物Eの内部には地下鉄の出入り口があり、約8.0m離れた場所に地下鉄トンネルがある。建物Eは約16m×10mのほぼ長方形をした8階建の中層事務所建物である。構造種別はSRC造(非充腹)であり、基礎形式は未確認であるが基礎深度・地盤状況から直接基礎と推定される。測定時には天井等の仕上げ材は存在していたが、什器、備品等がない状況であった。また、対象建物は測定後間もなく解体され、現在は存在しない。測定には周波数範囲がDC～100Hzの1成分サーボ型加速度計(IMV(株)製)を使用した。ピックアップをほぼ1階おきに配置し、スラブ振動の影響の少ない壁の入隅部に設置した。図 3.9に建物Eの測定システム図を示す。データはサンプリング周波数1kHz、A/D変換は16 bitで収録した。また、データ処理は地下鉄の通過時間約10～15秒間を含めた約16秒間でFourierスペクトル(バンド幅0.5HzのParzenウィンドウによる平滑処理を実施)を計算し、各点間のスペクトル比を計算した後、良好な測定結果が得られたものに対してのみ相加平均した。

表 3.1 測定した3棟の建物の概要

|             | 建物 A    | 建物 D             | 建物 E <sup>1</sup> |
|-------------|---------|------------------|-------------------|
| 対象軌道        | 地下鉄軌道   | 地下鉄軌道            | 地下鉄軌道             |
| 軌道と基礎との水平距離 | 0.0 m   | 0.9m             | 8.0 m             |
| 用途          | 集合住宅    | 集合住宅             | 事務所               |
| 階数          | 地上4階    | 地上14階            | 地上8階<br>地下2階      |
| 構造種別        | RC造     | RC造              | SRC造              |
| 構造形式        | 壁式      | 壁付ラーメン           | 壁付ラーメン            |
| 基礎形式        | 直接基礎    | 杭基礎<br>(杭長 20 m) | 直接基礎              |
| 基礎底位置       | GL-1.7m | GL-2.7 m         | GL-6.4 m          |
| 基礎梁成        | 1.6 m   | 2.8 m            | 不明                |

1: 数値は測定時に行った実測等による推定値

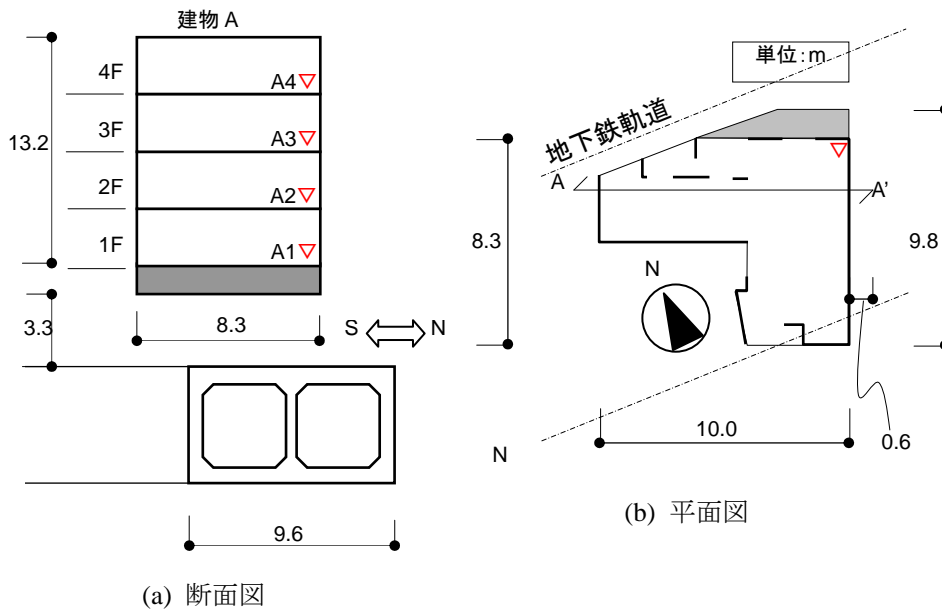


図 3.5 建物 A のピックアップ配置図

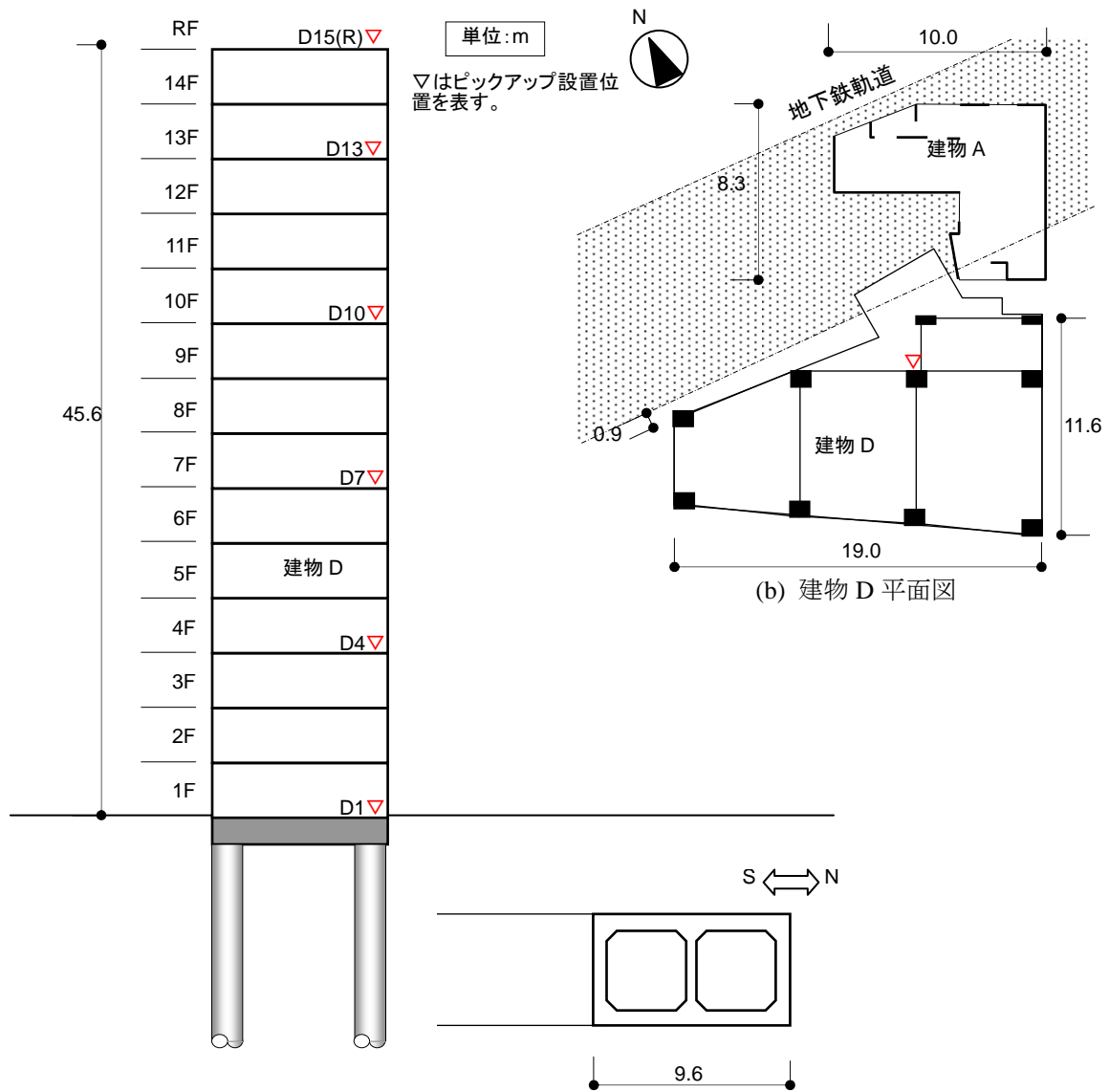


図 3.6 建物 D と地下鉄に関する概要図

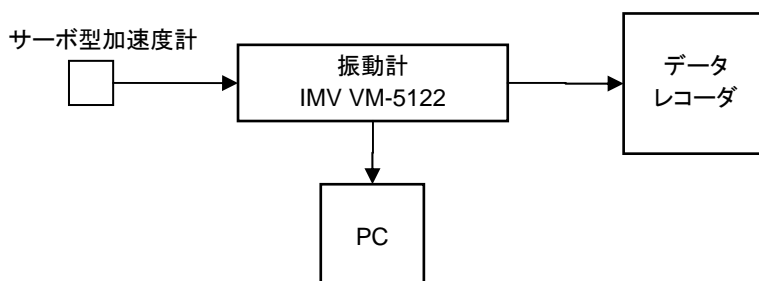


図 3.7 建物 D における測定システム図

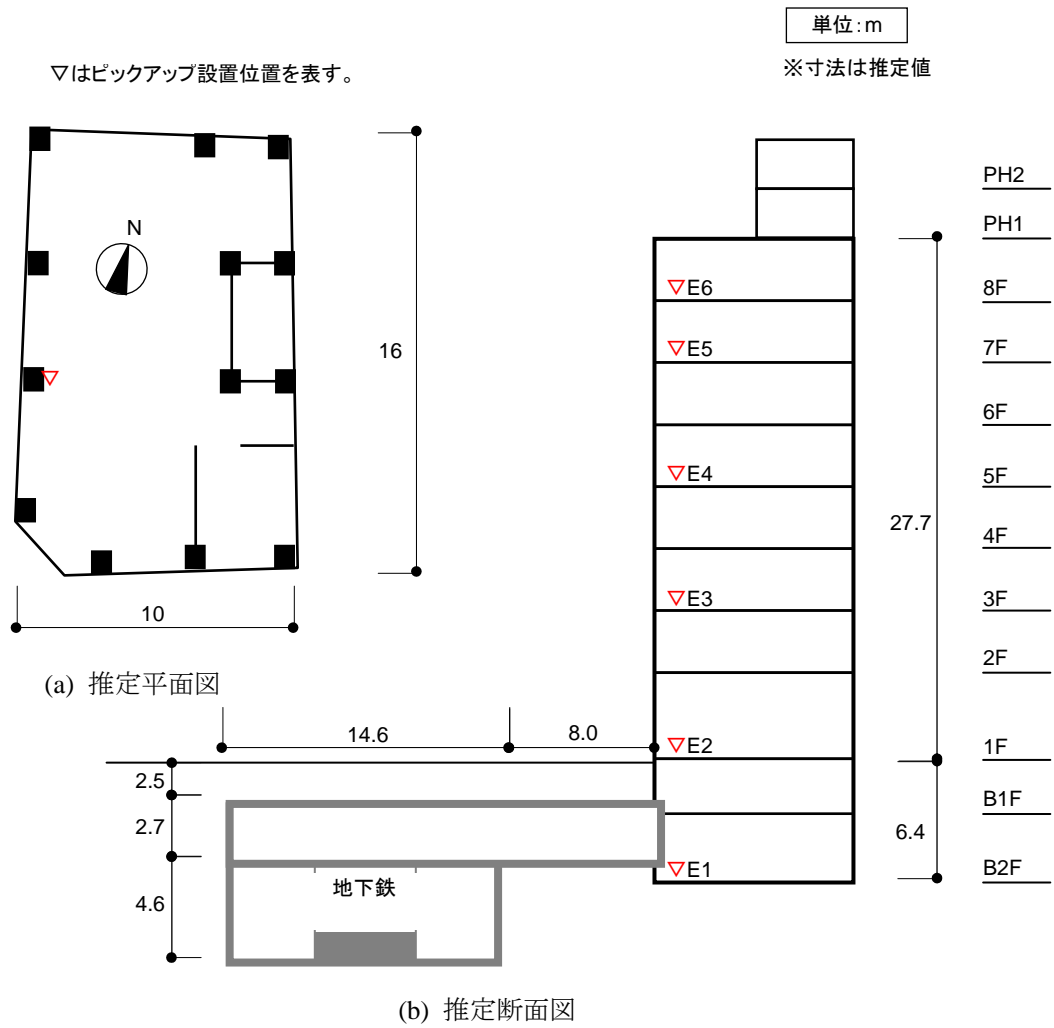


図 3.8 建物 E と地下鉄に関する概要図

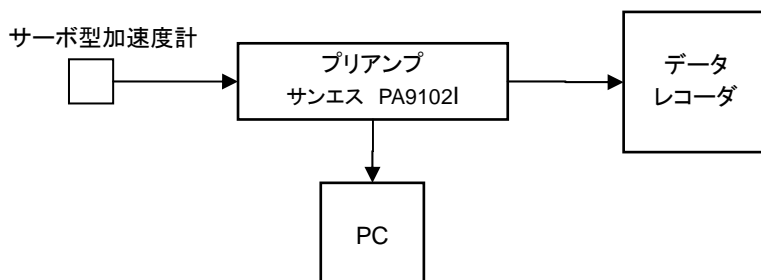


図 3.9 建物 E における測定システム図



### 3.3.2 簡易評価法と実測結果との比較とその適用性

上部構造の伝達率は、実測ではFourierスペクトル比（以下、スペクトル比）の計算により、解析では表 3.2に示す諸元を用いた多質点系モデルから式(3-31)により計算する。以下、解析モデルの構築方法について概説する。

表 3.2 多質点系モデル構築のための主な条件

|   |              | 建物 A  | 建物 D                         | 建物 E  |
|---|--------------|---|------------------------------|---|
| コンクリート設計<br>基準強度 $F_c$ (N/mm <sup>2</sup> ) |              | 33  | 33                           | 13.5  |
| Young 率(N/mm <sup>2</sup> )                 |              | $37.9 \times 10^3$  | $37.9 \times 10^3$           | $31.0 \times 10^3$                            |
| 代表断面  | 柱(mm)        | —   | 950 × 600                    | 550 × 550                                     |
|   | 壁厚(mm)       | 200   | 180                          | 150   |
| スラブ厚(mm)                                    |              | 200   | 200                          | 150   |
| 各階質量の代表値(t)                                 |              | 73.5  | 192                          | 185   |
| 各階剛性の代表値<br>× 10 <sup>3</sup> (kN/cm)       |              | 743.7   | 1,210                        | 620.4   |
| スラブ振動系の総数                                   |              | 3   | 3                            | 4   |
| スラブ振動系<br>有効質量<br>(t)                       | No.1         | 6.72  | 26.4                         | 32.2  |
|   | No.2         | 4.43  | 9.38                         | 10.1  |
|   | No.3         | 0.894   | 3.69                         | 3.09  |
|   | No.4         | —   | —                            | 2.44  |
| スラブ振動系<br>固有振動数<br>(Hz)                     | No.1         | 39.0  | 41.3                         | 10.6  |
|   | No.2         | 65.7  | 58.1                         | 17.9  |
|   | No.3         | 89.4  | 77.6                         | 32.7  |
|   | No.4         | —   | —                            | 53.1  |
| 減<br>衰<br>定<br>数                            | スラブ振動系を除く全体系 | $h_1=0.075, h_2=0.100, h_3=0.125, h_4=0.150, h_5 \sim =0.175$ |                              |   |
|   | スラブ振動系       | 0.03  |                              |   |
| モデル化に当たっての特記事項                              |              | スラブ振動系固有振動数は、周辺固定および単純支持の各条件で計算された振動数の平均値とした。                 | 同形状のスラブをまとめ、3種類のスラブ振動系を設置した。 | 2階の塔屋が存在するが、この部分の振動系を考慮せず、当該質量を屋上階の質量に加算している。 |

※数値は測定時に行った実測等による推定値

Young率 $E_i$ は鉄筋コンクリート構造計算規準（日本建築学会(1999)）によって求めたコンクリートのYoung率に静弾性係数に対する動弾性係数の比（三谷・成田(1969)）として1.3を乗じたものと、鋼材のYoung率 $2.1 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ とをそれぞれの部材断面積で重み付き平均した値とする。スラブ振動系のモデル化は、固有振動数が100Hz以下で、各階全質量に対する当該スラブの $mn$ 次モード有効質量比が100分の1以上のスラブのみ考慮した。減衰定数 $h_{ikmn}$ については、植松ほか(1997)によればRC造スラブの減衰定数が0.02~0.06程度に集中していること、また実測による応答倍率 $a$ を用いて $1/2a$ により減衰定数を評価すると約0.03であったことから、全てのスラブ振動系に対して一律に $h_{ikmn}=0.03$ とした。各質点の質量 $m_i$ は図3.3に示す当該体積にコンクリートの単位体積質量 $\gamma=2.4 \text{t/m}^3$ （SRC造の建物Eは $\gamma=2.6 \text{t/m}^3$ ）を乗じたものとし（建物D、Eでは仕上げ質量を $0.1 \text{t/m}^2$ と仮定して加算）、各層の鉛直剛性 $kv_{i,i-1}$ は雑壁等を無視した柱および壁のみの水平断面積 $A_i$ から式(3-14)より計算した。スラブ振動系を除く全体系の減衰定数は、これまでの測定結果のシミュレーション等から上下方向1次モードに対する減衰定数 $h_1$ が0.07程度であったこと、高次モードになるにしたがい減衰定数がやや大きくなると考えられることを考慮して、1次から4次までの減衰定数( $h_1 \sim h_4$ )をそれぞれ0.075, 0.10, 0.125, 0.150とし、5次以上の減衰定数を0.175で一定とした。

#### (1)建物Aの評価結果

図3.10に建物Aにおける上部構造の伝達率を実測結果と解析結果とを比較して示す。また、比較のためスラブ質点系を設置していない場合の伝達率も示す。なお、実測では屋上階にピックアップを設置していないため、1階に対する屋上階の伝達率の実測値は示していない。実測に見られる約55Hzの顕著なピークは解析でも認められる。解析のピークは多質点系モデルの1次モードであることから、実測結果に見られる約55Hzのピークは建物の上下方向の1次モード振動数であると推定される。また、実測結果に見られる37, 73Hz付近のやや小さなピークは、スラブ質点系を接続したモデルでは再現されるが、スラブ質点系を接続していない場合の解析では再現されない。これは、39.0Hzと65.7Hzに固有振動数を有するスラブ振動系の影響を受けて、これらの振動数において伝達率が落ち込み、逆にこれらの振動数の前後で伝達率にピークが生じたものと考えられる。すなわち、スラブ振動系がTMDとしての挙動をしたため、それらの固有振動数付近で伝達率が低下していることが分かる。また、各階質点には89.4Hzに固有振動数を有するスラブ質点系も接続されているが、有効質量が小さいためこの系による伝達率の低減効果は軽微である。さらに、実測と解析のピーク振幅はほぼ整合しており、設定した1次モード減衰定数 $h_1=0.075$ が概ね妥当であることが確認される。

#### (2)建物Dの評価結果

図3.11に建物Dにおける上部構造の伝達率を実測結果と解析結果とを比較して示す。両者を比較

すると約 12Hz の 1 次ピーク振動数および約 33 Hz 付近の振幅の小さい 2 次ピークはほぼ一致している。しかし、これ以上の高振動数領域における伝達率は、解析値は実測値を下回っており、必ずしもよく対応しているとはいえない。また、最上階を除くと実測が概ね 1~2 となっているのに対して解析は 1 以下となり、実測が解析をかなり上回っている。また、伝達率は異なるものの最上階を除く両者の伝達率は、凹凸はあるが上層階になるにしたがい一定の減少傾向が見られる。

このことは、建物 D のような条件の場合、松田ら(1979)の予測式における内部粘性項の仮定が有意であると思われる。なお、図には示していないが、解析から求まる伝達率が実測より小さいことから、本設定より小さなモード減衰定数を設定して伝達率を計算した。その結果、各次モード振動数のピーク値が大きくなるだけで、明確なピークの見られない実測結果に示されるような伝達率の傾向は見られなかった。

以上から、高層建物である建物 D の多質点系モデルによる評価は、約 30 数 Hz 以上の振動数領域で実測値と整合しないことが分かった。この理由として、建物 D には測定時に二重床や作り付けのキッチンカウンター、収納棚等が設置されており、これらが上下振動部材として上部構造の伝達率に影響していると考えられる。ただし、実測結果から伝達率は最大でも 2 程度であり、建物内の伝達率はそれ程大きくないことも明らかになった。なお、最上階で高振動数領域の伝達率が大きくなった理由として、最上階の測定点が他点より柔らかい防水シート上であったことが原因であると推測される。

### (3)建物 E の評価結果

図 3.12 に建物 E における上部構造の伝達率を実測結果と解析結果とを比較して示す。他の建物より全体的に伝達率が小さいため、グラフの最大値を 1/2 に縮小して示す。実測結果に見られる 30Hz 以下の伝達率の凹凸は解析結果でも概ね再現され、比較的整合している。しかしながら、30Hz 以上の振動数領域では、35Hz 付近や 50Hz 付近に見られるピークを解析では再現していない。

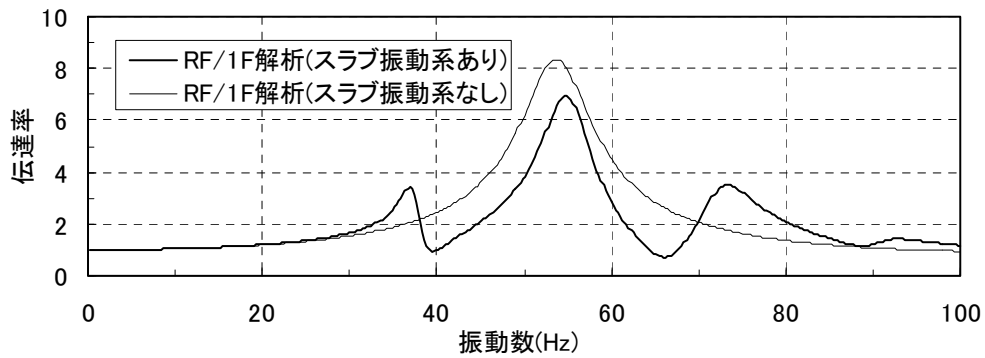
これは、建物 E の寸法、材料定数の設定を推定断面で行っているモデル化誤差が主原因であると思われる。スラブ振動系が接続されていない場合の 1, 2 次モード振動数の解析結果はそれぞれ約 15, 43Hz であり、一般的に 2 次モード振動数が 1 次モード振動数に対して約 3 倍となっているのに対して、実測に見られる 2 次モード振動数は 35Hz 付近とかなり低い振動数になっている。このような現象は上部階に比較的剛性の低い振動系が存在することで再現することができる。建物 E の場合は、最上階に設置された塔屋部分のモデル化が重要であると考えられる。

また、建物 E は建物 D と異なり、実測結果において 50Hz 以上の高振動数領域では、凹凸はあるものの伝達率が概ね 1 以下と小さくなっている。仕上げがないことが建物 D との大きな違いであり、仕上げの有無により高振動数領域の伝達率が変わってくるものと推定される。

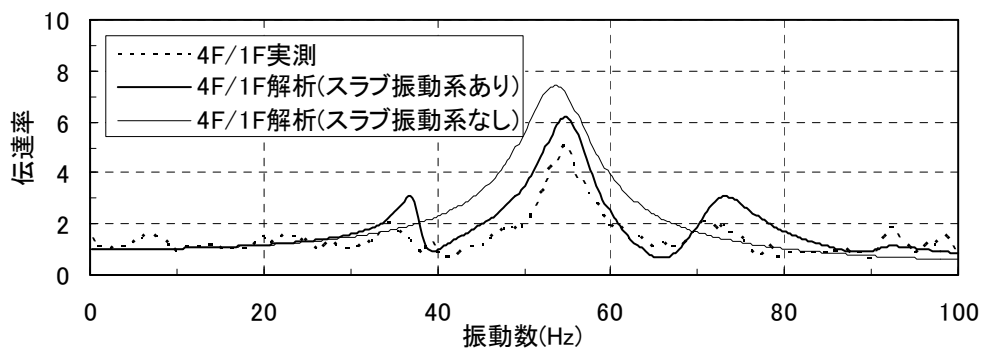
以上の結果から、実測結果から得られる伝達率にはスラブの上下振動部材の振動が大きく影響しており、多質点系モデルにより伝達率を算定する場合にはこれらの上下振動部材を適切に評価

することが重要である。3棟の建物の解析結果では、低層建物である建物 A は 100Hz 程度までは実測結果と良好に一致したが、建物 D, E では高振動数側で実測結果との整合性が取れていない。二重床等の仕上げや塔屋等、モデル化対象範囲の考え方およびそれらのモデル化が今後の課題である。また、本論文では最下階床に対する各階床の伝達率について検討したが、固体音を予測するためには建物 A, D に施工された防振シーツの影響や杭基礎の入力損失効果を適切に評価する必要がある。

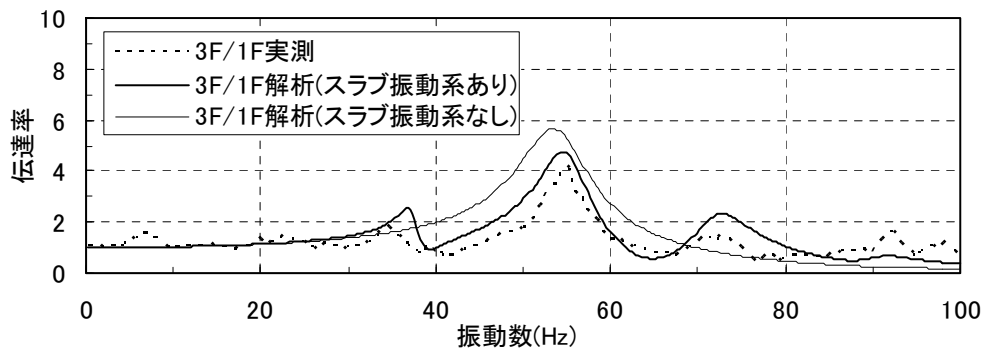
以上、3棟の建物に対する評価の妥当性について述べた。しかし、建物内の振動伝搬特性を評価する場合に評価精度を確保することも重要であるが、同時に評価時間の短縮も重要な課題であることは既に述べた。建物内の振動伝搬特性を評価する時間は前章の評価と同様に、計算の与条件を整理する時間と演算時間の和となる。簡易評価法に必要なパラメータは、柱、壁、梁、スラブの形状、Young 率、各階質量、減衰定数である。振動モードの影響を考慮して固体音の予測を行う場合はこれらのパラメータを設定することは不可欠である。しかし、一般的な集合住宅などでは部材の形状のパターンが多くないため、部材ごとに正確なパラメータを設定する必要はないと考える。したがって、これらのパラメータの設定に多くの時間を必要としない。また、簡易評価法の計算には Fortran 言語をコンパイルした実行モジュールを使用しているが、演算時間は極めて短い。以上より、評価時間の短縮に関する課題については簡易評価法により解決できると考える。



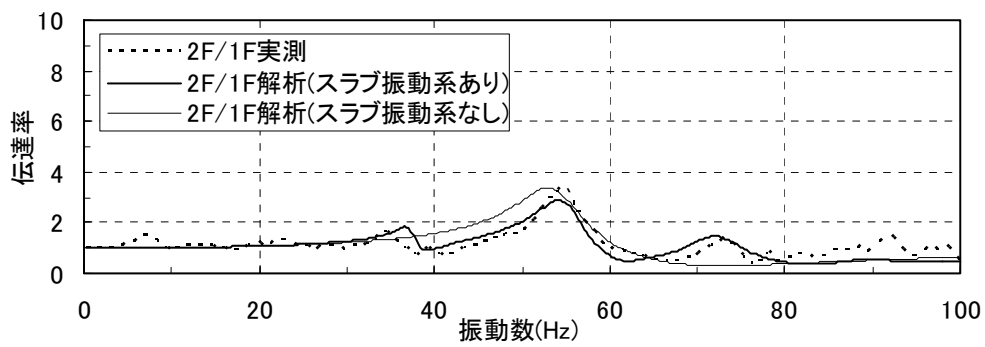
(a)1階に対する屋上階の上部構造伝達率



(b)1階に対する4階の上部構造伝達率

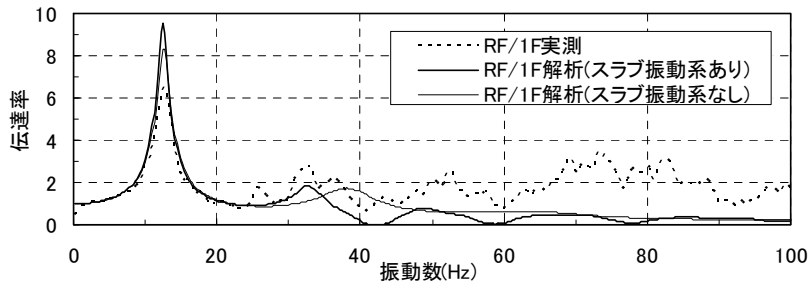


(c)1階に対する3階の上部構造伝達率

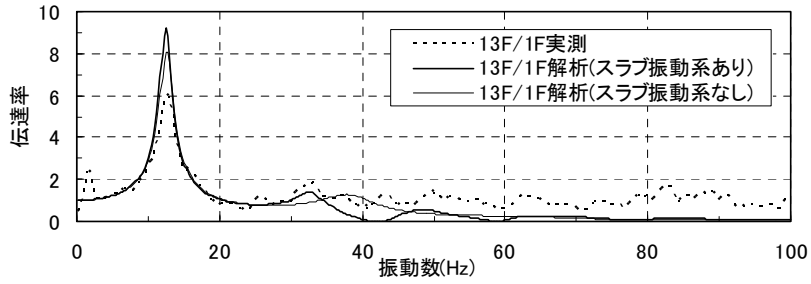


(d)1階に対する2階の上部構造伝達率

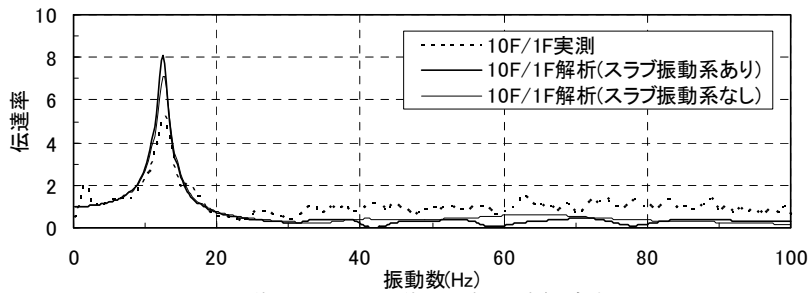
図 3.10 建物 A の上部構造の伝達率の実測値と解析値との比較



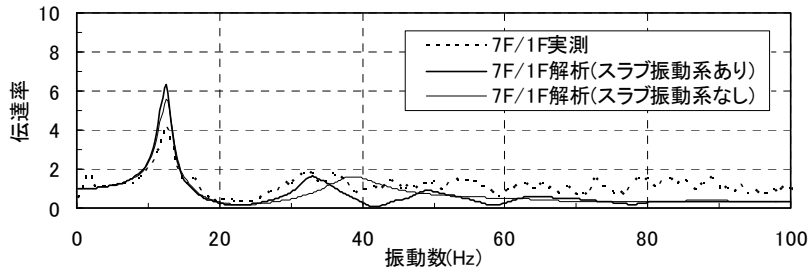
(a)1階に対する屋上階の上部構造伝達率



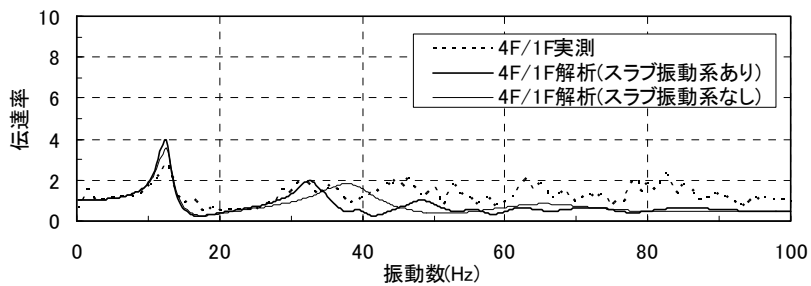
(b)1階に対する13階の上部構造伝達率



(c)1階に対する10階の上部構造伝達率

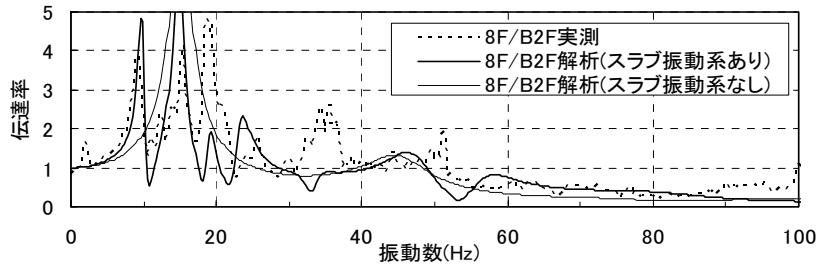


(d)1階に対する7階の上部構造伝達率

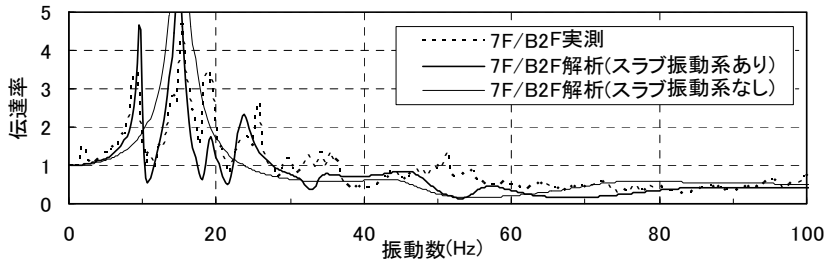


(e)1階に対する4階の上部構造伝達率

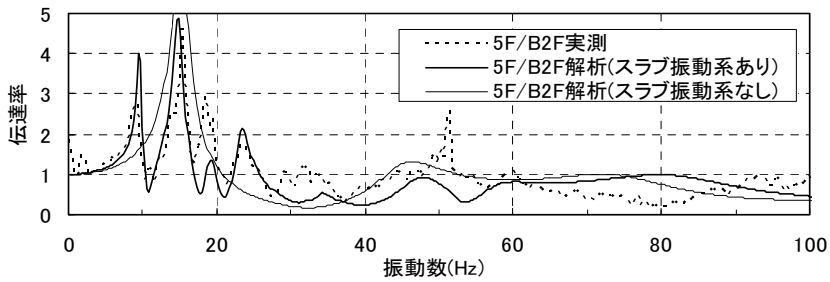
図 3.11 建物 D の上部構造の伝達率の実測値と解析値との比較



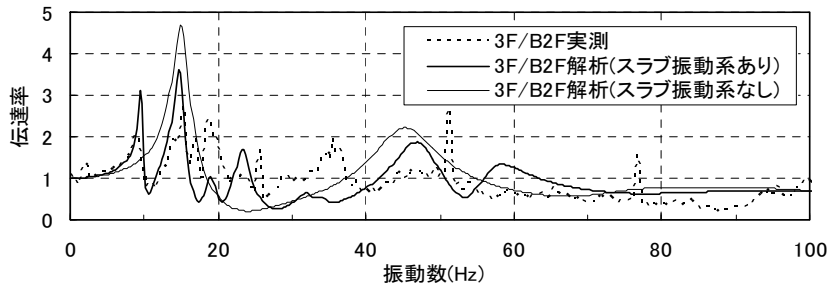
(a) 地下2階に対する8階の伝達率



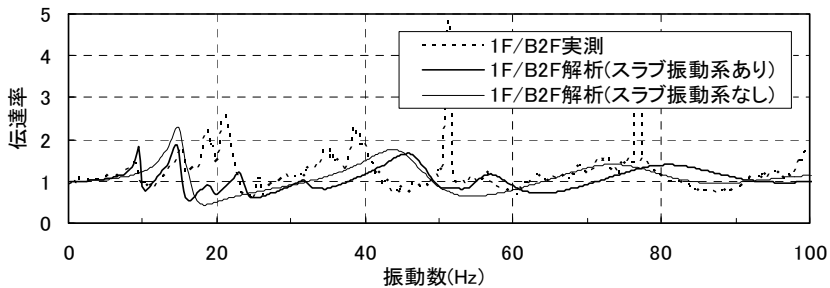
(b) 地下2階に対する7階の伝達率



(c) 地下2階に対する5階の伝達率



(d) 地下2階に対する3階の伝達率



(e) 地下2階に対する1階の伝達率

図 3.12 建物Eの上部構造の伝達率の実測値と解析値との比較

### 3.4 結び

本章では、固体音領域における建物内の振動伝搬特性（上部構造の上下方向の伝達率）を評価する方法として、スラブの振動を考慮した多質点系モデルを利用した簡易評価法を提示した。簡易評価法は、スラブの部材を平板の振動理論に基づく質点系モデルへの置換を定式化することにより、建物の構造部材をすべて多質点系モデルとして構築することができ、モデル化に必要な手続きおよび解析時間を大幅に低減することができることを特徴とする。

簡易評価法の妥当性を評価するために、3棟の建物の振動測定を実施し、その結果得られる伝達率と簡易評価法により得られる伝達率との比較を行った。その結果、低層建物である建物 A については実測と解析から求まる伝達率が概ね整合し、中層・高層建物である建物 D, E については低振動数領域での伝達率が概ね整合した。これらのことから、上部構造の伝達率を評価する場合に、スラブの上下振動部材の振動の影響を適切に考慮することが重要であることが分かった。また、スラブの固有振動数付近の伝達率が低下することから、スラブの振動系が TMD としての挙動をしていると考えられる。ただし、建物 D, E の高振動数領域において、提案した簡易評価法による結果と実測結果との整合性が低かった。この原因としては、解析モデルでは上下振動部材としてスラブの躯体部分のみを考慮したが、モデル化されていない二重床等の仕上げや塔屋の振動が影響していることが考えられる。建物 D, E の高振動数領域における伝達率の評価については今後の研究課題としたい。また、本章では最下階床に対する各階床の伝達率について検討したが、固体音を予測するためには建物 A, B に施工された防振シートの影響や杭基礎の入力損失効果を適切に評価する必要があると考える。



### 参考文献（第3章）

植松武是, 伊藤正義, 井野智, 杉野目章 (1997) : RC 床スラブの減衰定数推定法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2 分冊, pp.727-723

岡富邦広, 高島秀雄, 加藤泰正, 船水則行, 藤原達夫, 豊永雅之 (1996) : 境界梁を持つスラブの簡易解析 その2 固有振動数, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1 分冊, pp.331-332

柴田明德 (1981) : 最新耐震構造解析 森北出版

流田豊, 本間俊雄, 加藤泰正, 高島秀雄 (1996) : 境界バネ及び中間支持を持つ梁の形状関数について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1 分冊, pp.327-328

日本建築学会(1999) : 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説

松田由利, 橘秀樹, 石井聖光 (1979) : 建物構造体中における固体音の伝搬性状, 日本音響学会誌, 35 巻, 11 号 pp.609-615

三谷勝之, 成田一徳 (1969) : コンクリートはりの静弾性係数と動弾性係数に関する実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.39-40

山岸邦彰, 船水則行, 高島秀雄 (1997) : 床スラブの簡易解析法とその応用, 計算工学講演会論文集 Vol.2, pp.19-22



## 第4章

### 免震構法による固体音領域の振動低減特性の検討

---

## 4.1 まえがき

本章では、免震構法による固体音領域の振動低減特性について実測と解析により明らかにする。

本論文の目的で述べたとおり、固体音の低減対策として適用する工法には経済性と使用性を満足することが望まれるが、免震構法はそのような工法の一方法として注目されている。免震構法は元来、大地震時の安全性を高めることを目的として開発されてきているが、副次的に固体音に対する低減効果があると考えられている。たとえば、免震構法を適用することにより 20dB 程度の顕著な振動低減効果を確認したとする研究もある。しかし、免震構法を適用しても振動低減効果はほとんどないとする研究もあり、免震構法の適用による振動低減のメカニズムが必ずしも明らかになっているとはいえない。

これまでの研究は実測により振動低減効果を確認しているものが多い。しかし、固体音の低減対策工法として免震構法を適用する場合には、振動低減のメカニズムを解析的かつ定量的に把握する必要がある。また、実測研究は多いものの、振動低減のメカニズムを把握することのできる振動測定を実施している研究は少ない。

以上より、はじめに 4.2 節では、免震構法による固体音領域の振動低減効果に関する実測データの蓄積を目的として、20 階建て集合住宅に対して実施した振動測定の概要および結果について述べる。振動測定は、基礎内の振動伝搬特性および免震層の振動低減効果を把握することを目的として実施した。

次に、4.3 節では、実測した建物を含む、階数の異なる試設計された免震建物の振動解析を実施して、前述した実測結果との整合性、および振動低減に寄与する要因について述べる。はじめに、検討に用いた免震建物の概要、および解析パラメータについて述べる。解析パラメータは実物の建物に適用されている免震部材の仕様や構造の仕様を参考に設定されている。次に、解析結果より得られる伝達率、免震部材の鉛直剛性の違いによる振動加速度レベル差、既往の研究との比較についてそれぞれ示し、振動低減に寄与する要因について述べる。

4.4 節では、結びとして第 4 章のまとめを記す。

## 4.2 実測による免震建物の振動低減効果

### 4.2.1 実測した建物と測定目的

実測した建物は第2章に示した建物Cである。振動測定は、(1)基礎内の振動伝搬、(2)免震層の振動低減、の各特性を把握することを目的に測定点を設定した。建物の概要については第2章を参照されたい。なお、測定概要については次項で述べる。

### 4.2.2 実測による各種振動伝搬特性

#### (1) 基礎内の振動伝搬特性

##### (1-a) 測定概要

ピックアップ配置図は第2章に示した図2.9と同一である。測定方向は上下方向(Z方向)と南北方向(X方向)とした。

##### (1-b) 地表の Fourier スペクトル

図4.1に地表で測定された加速度波形(Z, X方向)のFourierスペクトル(バンド幅0.5HzのParzenウィンドウで平滑化)の平均値を示す。凹凸はあるものの、FourierスペクトルはZ方向で約65Hz, X方向で約50Hz付近にピークが見られる。特に、Z方向のスペクトル形状は吉岡ほか(1995)の検討結果と整合しており、高架軌道から発生する地盤振動特性がよく現れているものと考えられる。

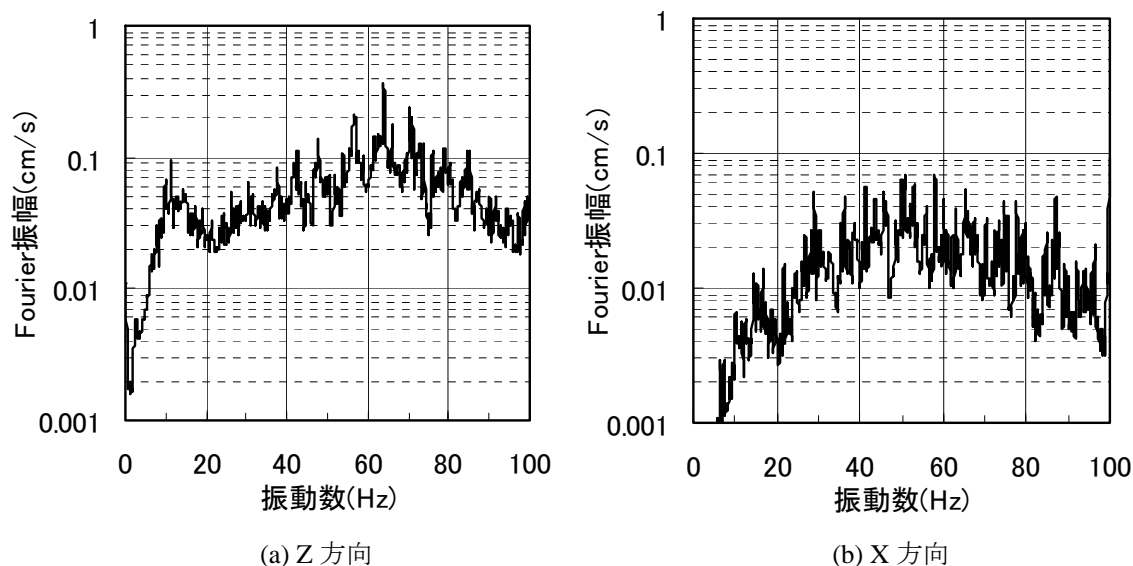


図 4.1 地表の Fourier スペクトル

### (1-c) 基礎内の振動伝搬

基礎の振動挙動を明らかにするために、基礎内の振動伝搬特性を検討する。鉄道軌道から最短距離にある測定点C-2を基準点としたときの、他の測定点(C-1,C-3,C-4,C-5)の位相遅れの実測値を図4.2に示す(図中黒丸)。磁北とほぼ一致する建物の通り芯に対して高架軌道が約45度傾いた位置にあるため、北東方向から平面波が到来するものと仮定した。位相遅れの実測値はクロススペクトルの位相角から計算した。位相遅れの推移は規則的な傾向にあるもののばらつきが大きい。各測定点の位相遅れが連続性を保つように再評価したものを図中白四角で表す(推定値)。図4.3に、基準点C-2に対する各測定点の距離をもとに、位相遅れの推定値から算定した位相速度(実測位相速度)を示す。振動数が高くなるにしたがい位相速度が低下する正分散の傾向を示している。比較のために第2章図2.12に示した当該地盤におけるRayleigh波の基本モードの理論位相速度を重ねて示す。図4.3より、40Hz以上では実測値が理論値を上回るものの、これより低い振動数範囲の10~40Hzでは、実測位相速度とRayleigh波の理論位相速度は概ね一致している。このことから、基礎内の位相速度は周辺地盤のRayleigh波位相速度の影響を強く受けているものと考えられる。なお、40Hz以上の振動数領域においては、理論位相速度は表層のせん断波速度(170m/s)に近づくのに対し、図4.4に示すように基礎底が支持地盤に位置することにより支持地盤のせん断波速度(400m/s)の影響を受けるため、170m/sまで低下しなかったものと考えられる。参考にせん断波速度170m/sの層を除いた場合のRayleigh波の理論位相速度を図4.3に重ねて示す。この理論位相速度と実測位相速度とは調和的であることが分かる。

以上のことから、基礎板は剛体的な挙動をしているのではなく、地盤変位に連動した挙動をしているといえる。

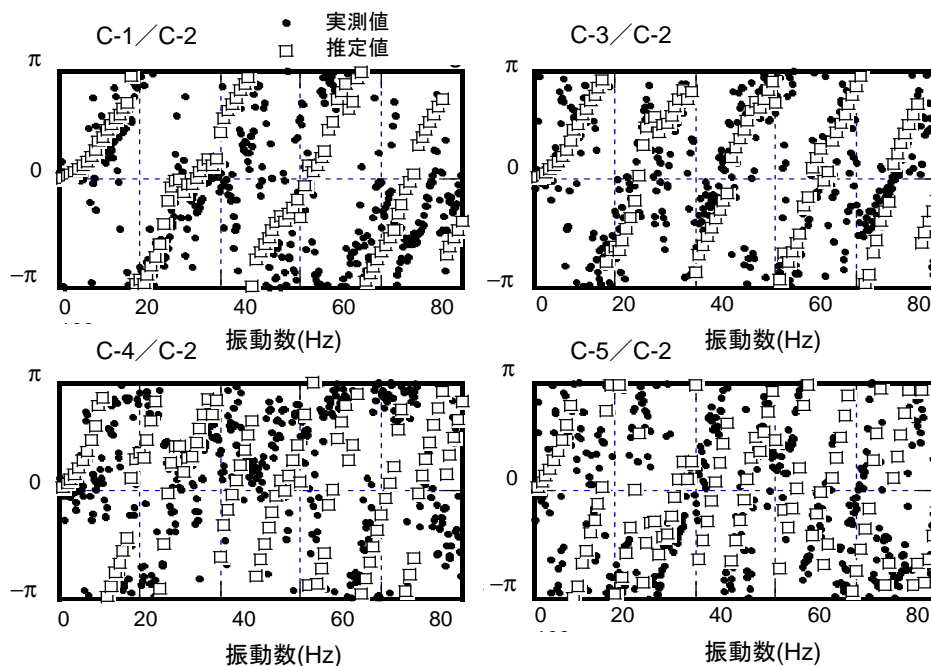


図 4.2 免震階床の基準点(C-2)に対する各測定点の位相遅れ

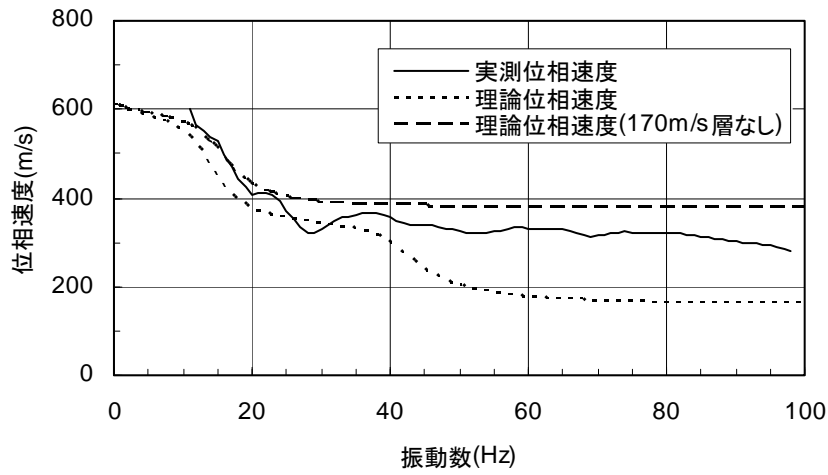


図 4.3 Rayleigh 波の位相速度の実測値と理論値（基本モード）の比較

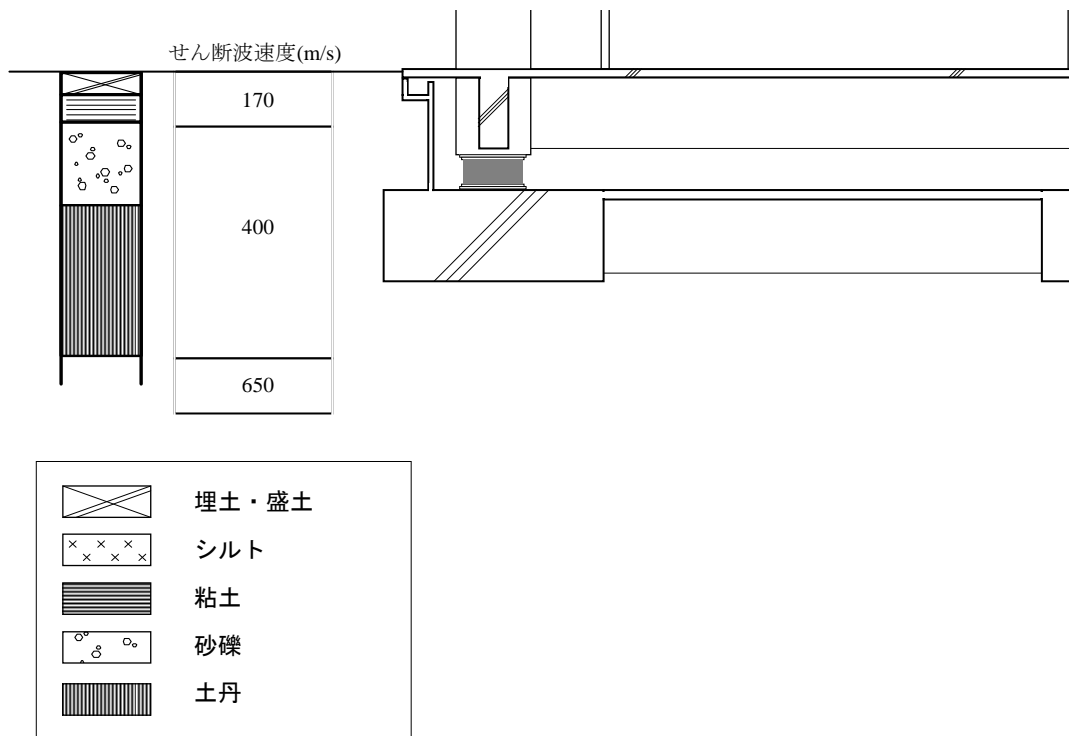


図 4.4 建物 C の基礎と土質柱状図・せん断波速度分布との位置関係

## (2) 免震層の振動低減効果

### (2-a) 測定概要

ピックアップ配置図を図 4.5(a)に示す。測定点は免震部材を挟む上下基礎部分に 3 箇所(C1-1～C1-6)、免震階床に 6 箇所(C2-1～C2-6)、1 階床に 6 箇所(C2-7～C2-12)の合計 18 箇所である。

免震部材を挟む上下基礎については、免震部材近傍で測定するために軽量でかつ直接部材に接着することが容易な圧電型加速度計を使用し、ワックスを使用して取り付けました。測定方向はZ方向である。その他のピックアップはサーボ型加速度計を使用し、上下階のほぼ同位置に振動の影響の少ない柱脚部に設置した。測定方向はX, Y, Z方向である。ピックアップの設置詳細を図 4.5 (b) に示す。

## (2-b) 測定結果

図 4.6に免震部材を挟む上下基礎間（以下、基礎間）と、免震階床に対する1階床（以下、層間）の上下方向の振動加速度レベル差を示す。ここで、レベル差は各測定点の平均値である。層間のレベル差は各振動数でほぼ等しく、概ね 2dB程度であるが、基礎間は高振動数でレベル差がやや大きくなる。両者に差が生じた理由として、周辺の梁やスラブの振動および床仕上げ（長尺塩ビシート）の影響によるものと推測される。以上の結果から、固体音が問題となる約 30~100Hzの範囲において、免震部材による振動の低減効果は 2~5dB程度であるといえる。

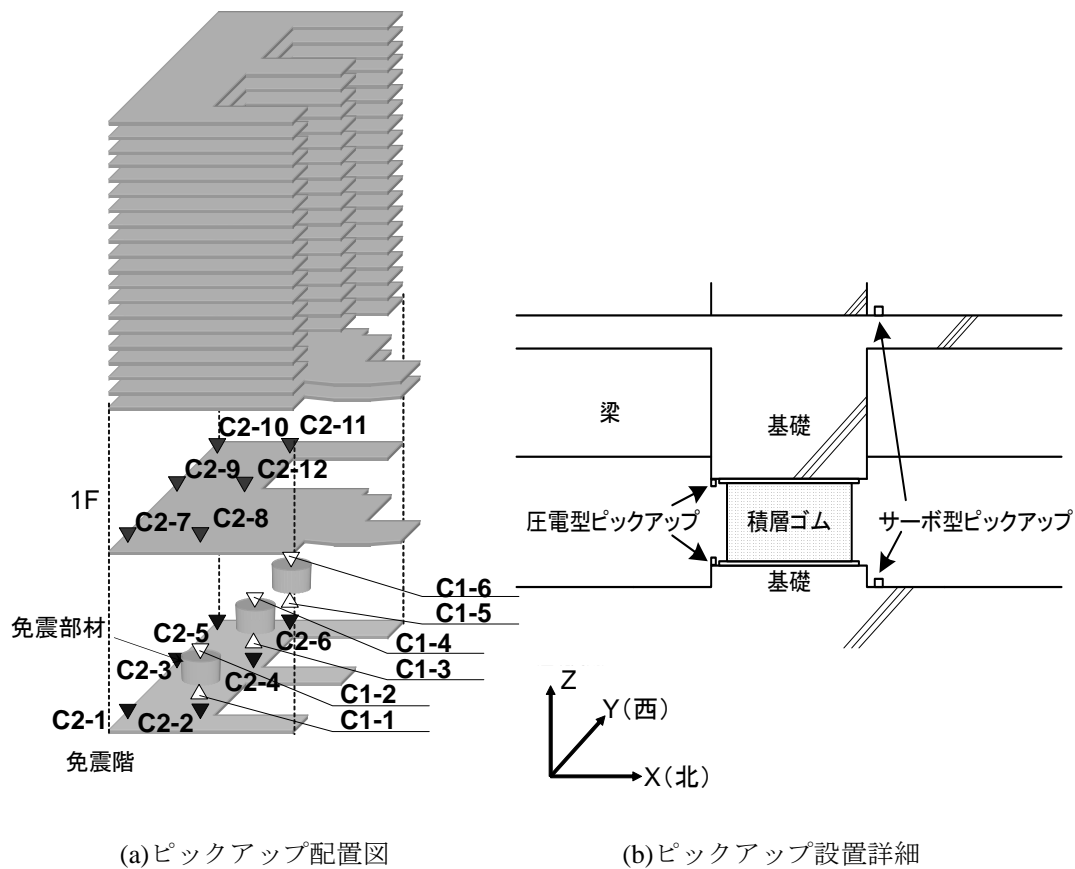


図 4.5 免震層の振動低減特性把握のためのピックアップ配置図



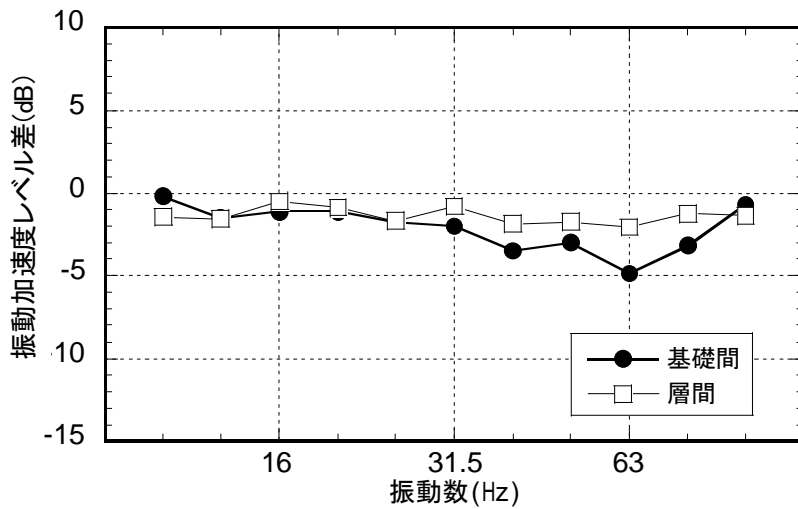


図 4.6 免震部材を挟む基礎間および層間の振動加速度レベル差(上下)

図 4.7に水平方向 (X, Y方向) について、免震階床に対する 1 階床の振動加速度レベル差の各測定位置の平均値を示す。Z方向と比較すると、X方向は鉄道振動で主となる 40~80 Hzの振動数領域において振動加速度レベル差が 3~8dB程度とやや大きい。一方、Y方向の振動加速度レベル差は最大で 3dB程度である。これは、X方向 (連層耐震壁構造) がY方向 (純ラーメン構造) よりも水平剛性が高いため、X方向でより免震効果が現れたものと考えられる。ただし、20Hz以下の低振動数領域では振動加速度レベルが増大している部分も見られる。

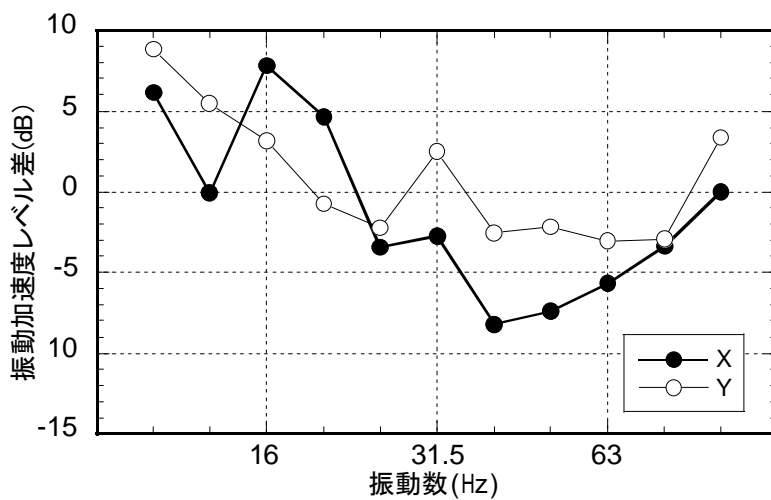


図 4.7 免震階床に対する 1 階床の振動加速度レベル差(水平)

### 4.3 免震建物の振動低減効果の解析的検討

#### 4.3.1 検討対象とした試設計建物の概要

第3章で述べたように、多質点系モデルにより建物の応答を適切に評価できることから、このモデルを用いて免震部材による建物内の上下振動低減効果に関する定量的評価を行う。解析モデルは、図4.8に示すような板状集合住宅を想定した上部構造—免震層—下部構造（杭基礎）からなる多質点系モデルである。上部構造および免震層の鉛直剛性は、表4.1の試設計建物の部材寸法から前述の方法で算定する。下部構造は杭径および図4.9に示す想定地盤の諸定数に基づきMindlin解を用いて算定する。解析パラメータは上部構造を剛体とみなしたときの上下振動数（以下、免震上下振動数 $f_{RV}$ ）および建物階数（5, 10, 15, 20）である。

なお、20Fモデルの上部構造は第2章に示した測定対象建物とほぼ同一である。免震上下振動数 $f_{RV}$ は、一般的な免震構造を想定して10~14Hz（1Hzピッチ）とする。設定した $f_{RV}$ の値は、各メーカーの積層ゴムの仕様から、面圧 $\sigma$ を10~14N/mm<sup>2</sup>と仮定した場合に計算される $f_{RV}$ が図4.10に示すような範囲に存在することを根拠としている。また、比較のために免震層を固定した非免震モデルを設定する。減衰は各部別一定減衰とし、上部構造では $h_B=0.05$ 、免震層では $h_R=0.005$ 、下部構造では $h_p=0.10$ とする。図4.11に非免震モデルに対する免震モデルの1~3次固有振動数の比を示す。1次固有振動数の比は、建物階数が低いほど、また $f_{RV}$ が低いほど小さくなっている。2, 3次固有振動数の比はややばらつきが大きくなっているが傾向は概ね同様である。

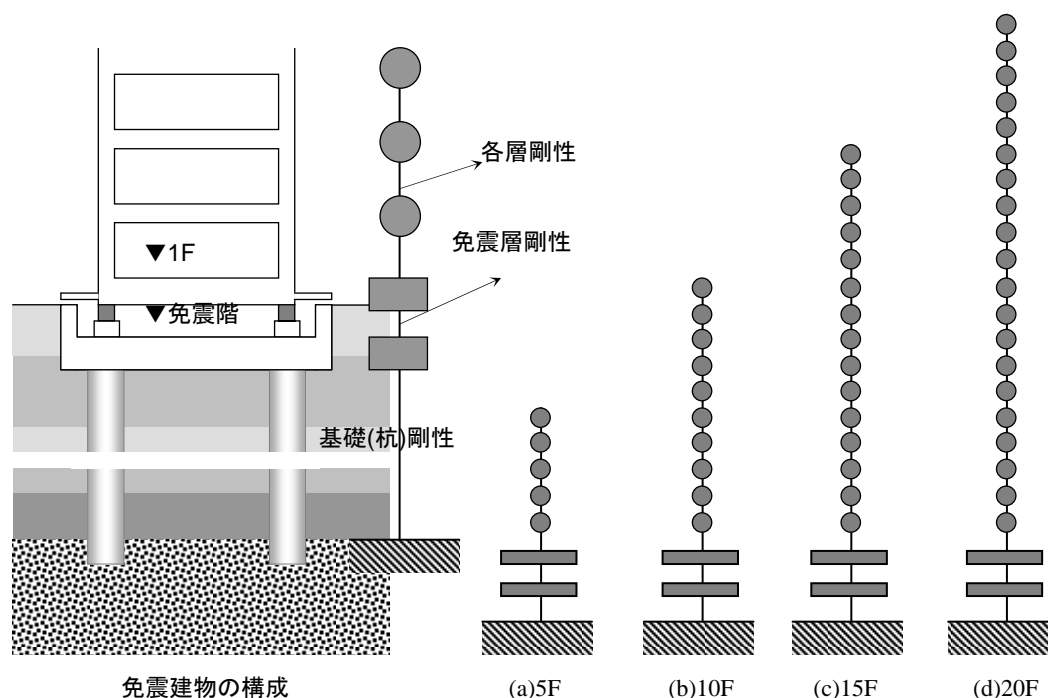


図 4.8 免震建物の検討用解析モデル

表 4.1 試設計建物の主な諸元

|                      | 5F   | 10F  | 15F  | 20F   |
|----------------------|------|------|------|-------|
| 柱 (mm)               | □750 | □800 | □900 | □1000 |
| 壁厚 (mm)              | 200  | 200  | 250  | 250   |
| $F_c(N/mm^2)$        | 24   | 36   | 40   | 48    |
| 密度( $N/mm^3$ )       | 23.0 | 23.0 | 23.0 | 23.5  |
| Young 率( $kN/mm^2$ ) | 23   | 24   | 26   | 30    |
| ゴム径(mm)*             | 662  | 840  | 987  | 1,114 |
| ゴム総高さ(mm)            | 200  | 200  | 200  | 200   |
| 杭径(mm)               | 1300 | 1700 | 2000 | 2200  |

\*面圧 $\sigma=10N/mm^2$ のとき

スパン : 桁行 7,000mm, 張間 10,000mm

階高 : 3,000mm, 杭長 30,000mm

単位面積質量 : 1.4t/m<sup>2</sup>

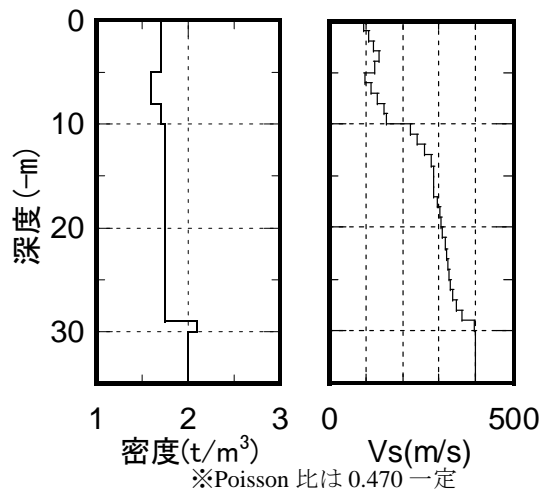


図 4.9 想定地盤モデル

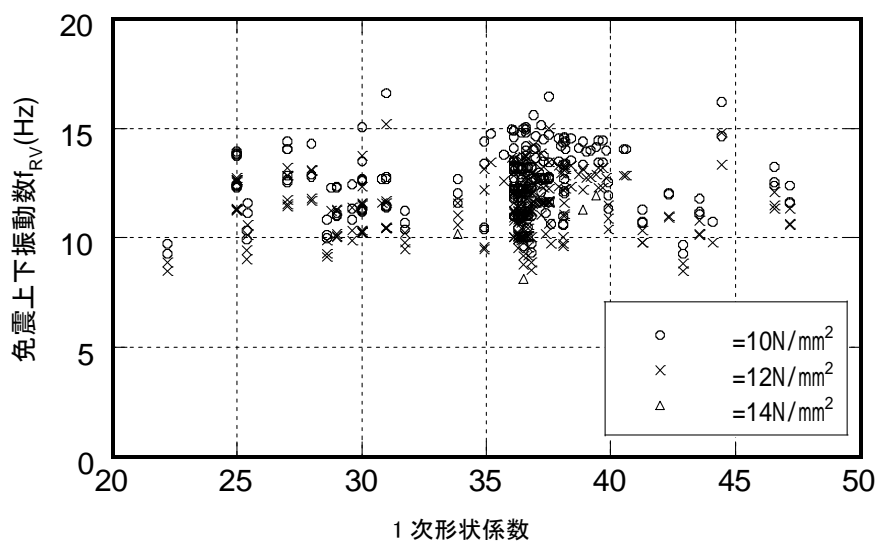


図 4.10 積層ゴムの 1 次形状係数と免震上下振動数  $f_{RV}$  の関係

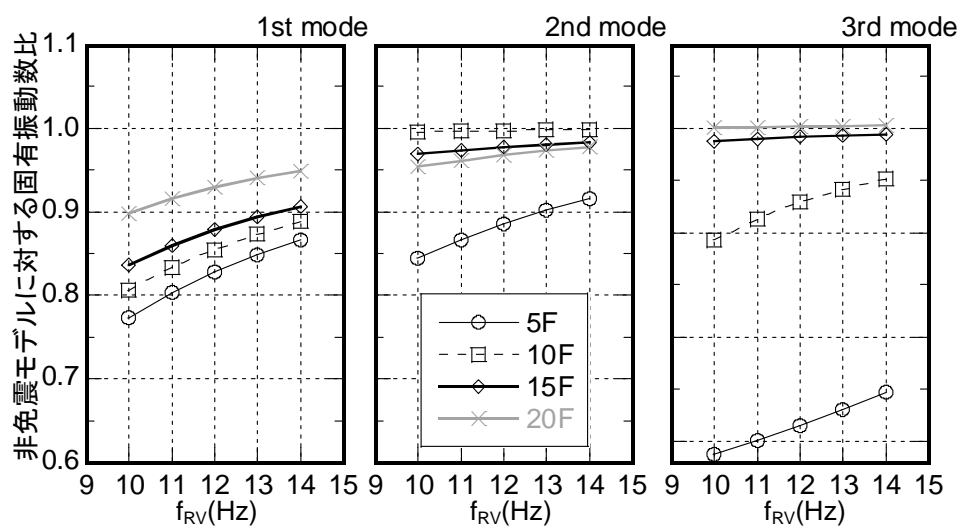


図 4.11 非免震モデルに対する固有振動数比

#### 4.3.2 解析による振動低減効果および既往の研究結果との比較

##### (1) 伝達率

図 4.12 に免震上下振動数  $f_{RV}$  を 14Hz としたときの免震階床に対する 1 階および屋上階 (RF) 各床の伝達率を、1/3 オクターブバンド分析結果とあわせて示す。解析結果から、伝達率では各次モードの影響によるピークと谷が認められる。固体音が問題となる数 10Hz 以上の振動数領域で振動低減効果を確認する場合は、この凹凸の影響を反映する必要がある。1/3 オクターブバンドにより評価すると、ばらつきはあるものの低層モデルの方がレベル差の絶対値は大きくなっている様子が分かる。前述した測定対象建物と同じ 20F モデルの免震階床に対する 1 階床の振動加速度レベル差は 40Hz 以上で 1~4dB 程度であり、本測定結果と整合する。

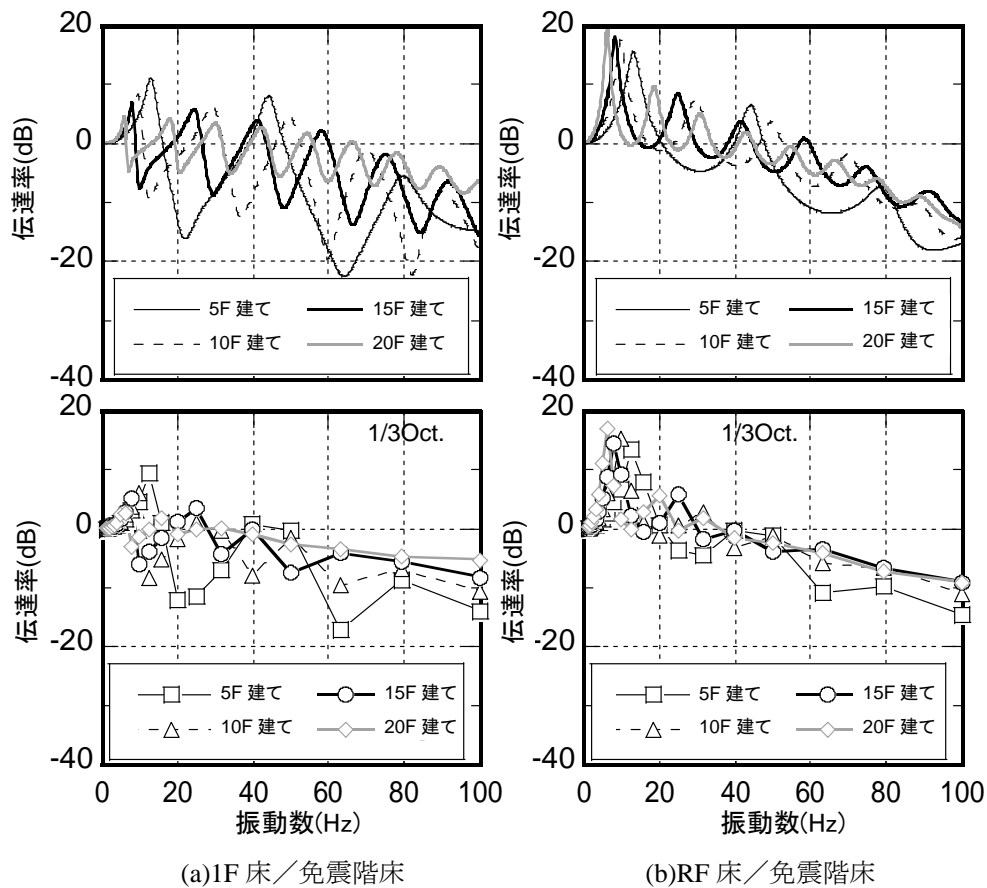
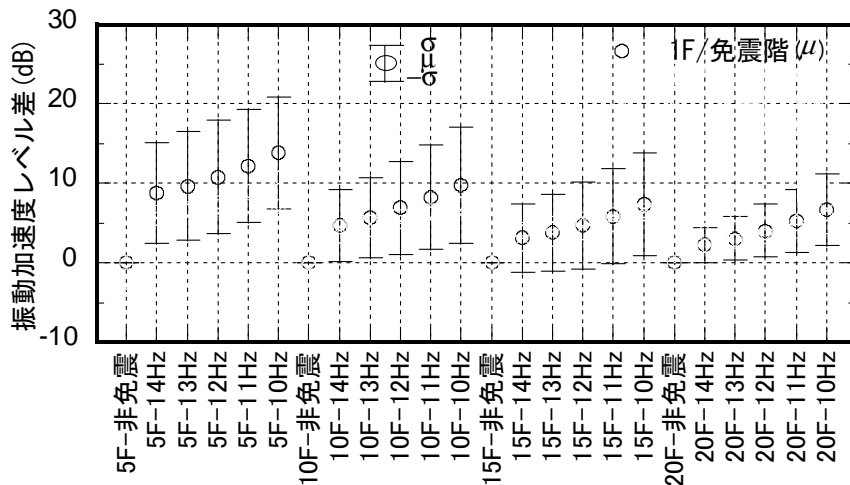


図 4.12 免震階床に対する 1 階床, RF 床の伝達率

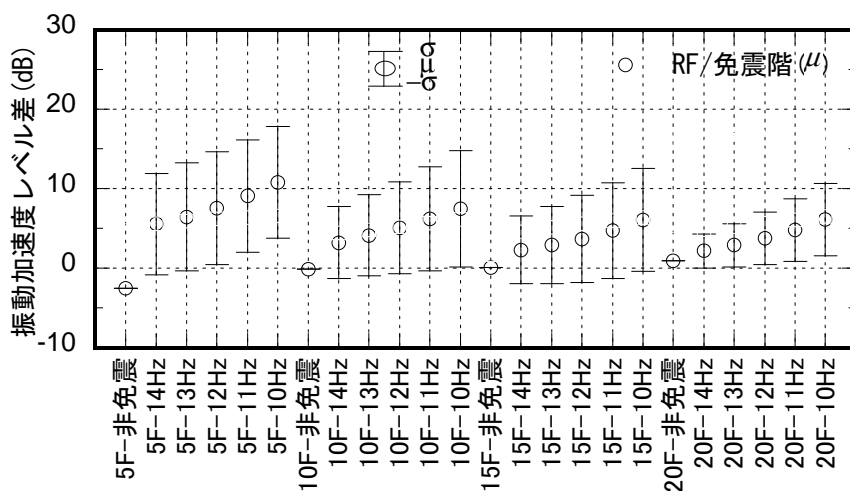
##### (2) 免震上下振動数と振動加速度レベル差

図 4.13 に免震上下振動数  $f_{RV}$  をパラメータとして、免震階床に対する 1 階床および RF 床の振動加速度レベル差の平均値 ( $\mu$ ) と標準偏差 ( $\pm\sigma$ ) を階数ごとに示す。ここでいう振動加速度レベル差の平

均値とは、振動数 20~100Hz の 1/3 オクターブバンド値の相加平均である。免震階床に対する 1 階床の振動加速度レベル差は、各階数とも  $f_{RV}$  が低くなるにしたがい、また階数が少なくなるにしたがい大きくなる。このことは、同一の建物に対して  $f_{RV}$  が低くなるほど、また同一の  $f_{RV}$  に対して階数が低くなるほど全体系振動数に対する免震部材の寄与度、すなわち  $f_{RV}$  の影響度が大きくなるため、振動低減効果が大きくなるものと考えられる。ただし、本検討では  $f_{RV}$  を 10~14Hz とした一般的な免震上下振動数の範囲内で検討を行ったが、固体音低減を目的として  $f_{RV}$  を低下させることは、免震部材のクリープの増大、地震時の上下振動やロッキング振動の卓越、交通振動における共振などが問題となる可能性が高いことに留意する必要がある。また、階数が多くなると高次モードのピーク振動数の繰返し間隔が短くなるため、 $f_{RV}$  が大きくなるほど、また階数が多くなるほど 1/3 オクターブバンド値のばらつきが小さくなっている。なお、これらの傾向は免震階床に対する RF 床の振動加速度レベル差についても同様に見られる。



(a) 1F 床 / 免震階床

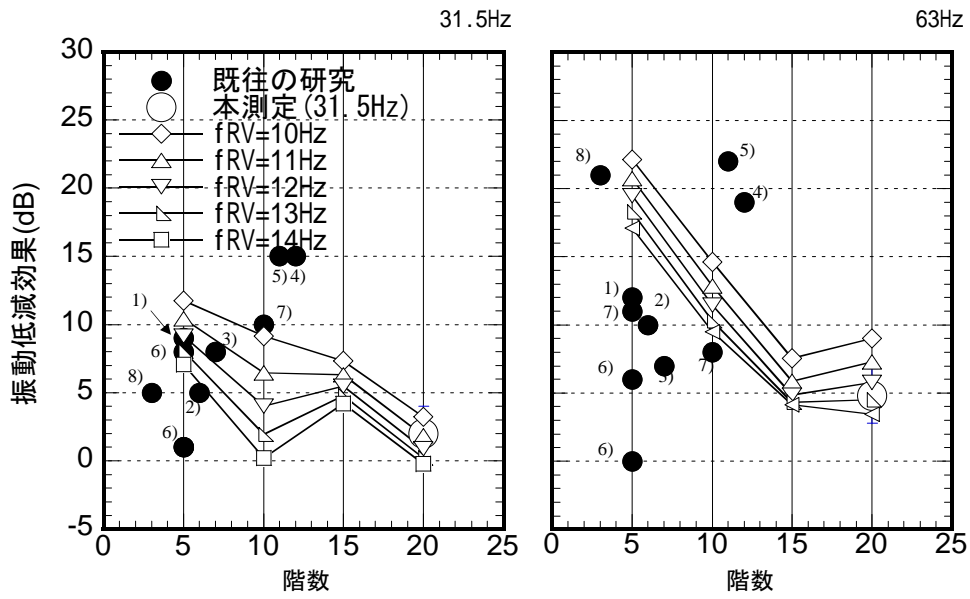


(b) RF 床 / 免震階床

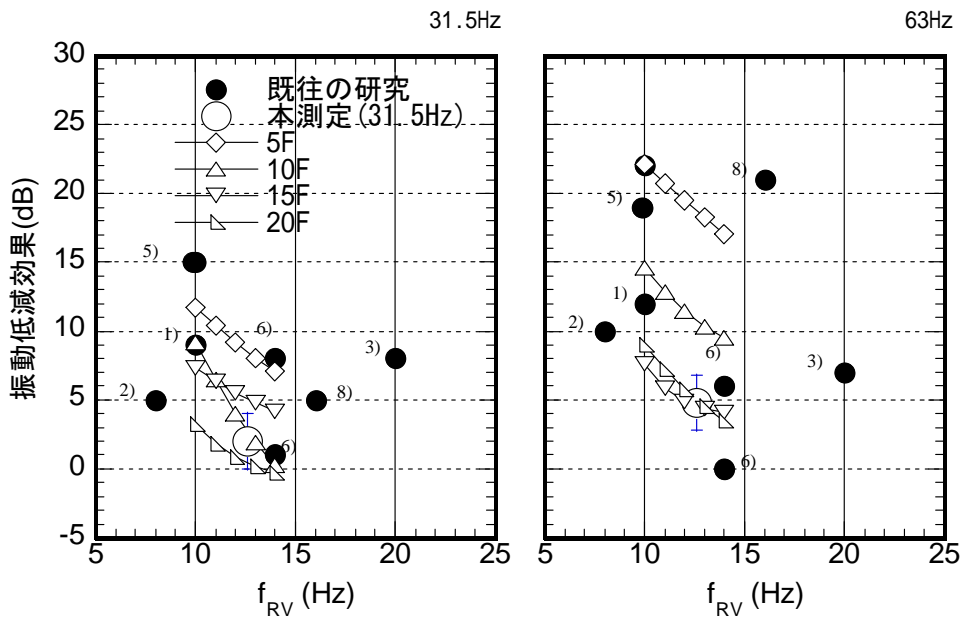
図 4.13 階数および免震上下振動数に対する振動加速度レベル差

### (3) 階数の違いと振動低減効果の関係および既往の研究成果との比較

図 4.14に前項の解析結果から得られた免震構造による上下振動低減効果と建物階数および免震上下振動数 $f_{RV}$ との関係を、中心振動数 31.5, 63Hzの 1/3 オクターブバンド値で示す。また同図には、既往の研究および本測定結果による振動低減効果も示す。なお、同図の縦軸は振動加速度レベル差と同義であるが、効果の程度を示している既往の研究結果と併記するため、縦軸を振動低減効果とする。既往の研究の建物階数は免震層より上の地下を含む階数としている。なお、図中に示す本測定建物の $f_{RV}$ の値 (12.6Hz) は、実測結果から算定した。建物階数と振動低減効果の関係 (図 4.14(a)) では、建物階数が多くなると免震による振動低減効果が小さくなる傾向を示す。これは、階数が多くなるにしたがい全体系振動数に対する免震部材の寄与度が小さくなり、上部構造の応答が優勢になるため、振動低減効果が小さくなったものと考えられる。ただし、伝達率における各次の凹凸の影響により、一部の階数で振動低減効果の逆転が見られる。既往の研究結果と解析結果との比較において、一部の結果を除けば 31.5Hzでは概ね整合しているが、63Hzでは解析結果の方がやや大きい。また、 $f_{RV}$ と振動低減効果の関係 (図 4.14(b)) では、 $f_{RV}$ が高くなるにしたがい免震による振動低減効果が小さくなる傾向が確認される。この傾向は既往の研究結果と調和的である。



(a) 建物階数と振動低減効果



(b) 免震上下振動数と振動低減効果

図 4.14 免震による振動低減効果

(片括弧数値は以下の文献を表す)

- 1)阿部ほか(1996), 3)中澤ほか(1998), 4)綿谷ほか(2002), 5)松岡ほか(1999a),  
 6)松岡ほか(1999b), 7)濱口ほか(1999), 8)近藤ほか(1998), 9)戸松ほか(1998)  
 ただし, 4)は26階建のうち9階まで施工した段階



#### 4.4 結び

本章では、耐震安全性を高めるだけでなく副次的に固体音対策として有効とされる免震構法について、その振動低減効果を明らかにすることを目的として、はじめに 20 階建て集合住宅に対して実施した振動測定の概要および結果について述べ、次に実測した建物を含む、階数の異なる免震建物の振動解析を実施して、上記実測結果との整合性、および振動低減に寄与する要因について述べた。

20 階建て免震建物の振動測定により、免震階における基礎の動的挙動を明らかにする目的で基礎内の振動伝搬特性と、免震層の振動低減効果について確認した。これらの実測結果から、基礎内の振動伝搬については基礎板が剛体的な挙動ではなく、地盤の Rayleigh 波の位相速度に連動して挙動していることが分かった。また、実測した建物においては、免震構法を採用したことによる振動低減効果は上下振動に対して 2~5dB 程度であり、既往の研究結果に見られるような顕著な効果を確認することができなかった。

次に、実測建物を含む階数の異なる免震建物を模擬した多質点系モデルによる振動解析を実施した。その結果、建物階数が多いほど、また免震上下振動数  $f_{RV}$  が高いほど振動低減効果が小さくなることが分かった。実測した建物の振動低減効果と解析結果から得られる振動低減効果は、ほぼ整合している。また、他の研究結果と本章に示した解析結果から得られる振動低減効果との整合性は高くない。これは解析モデルが適切でないだけでなく、他の研究成果における振動低減効果の算出方法にばらつきがあることが関係している。今後、免震建物の振動低減効果に関する測定データを蓄積して、統一的にデータを整理することが重要である。

実測した建物のような超高層の免震建物の場合には、固体音領域における振動低減効果を期待できないことが明らかとなったが、本章の解析結果の知見を利用して免震上下振動数  $f_{RV}$  を低くすることにより、大きな振動低減効果が得られる可能性があることが分かった。しかし、固体音の低減を目的として免震上下振動数  $f_{RV}$  を低下させることは、免震部材のクリープの増大、地震時の上下振動やロッキング振動の卓越など、固体音の低減以外に影響を及ぼす可能性が高いため、安易に免震上下振動数  $f_{RV}$  を低下させることは好ましくないと考える。

#### 参考文献（第4章）

- 阿部隆之, 莊大作 (1996): 免震構造による地下軌道からの固体音対策 (集合住宅), 音響技術, pp.16-19
- 岩本毅, 山岸邦彰, 有松重雄, 赤尾伸一, 原田浩之, 野路利幸 (2004): 鉄道軌道に近接する免震建物の振動伝搬特性 (その 2) 基礎の入力損失と免震層の振動伝搬特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.259-260
- 近藤誠一, 大脇雅直 (1998): 鉄道近接免震集合住宅への固体音の伝搬に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.239-240
- 戸松征夫, 渡邊秀夫, 飯塚信一, 松岡明彦, 佐々木亮治, 土屋裕造 (1998): 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.239-240
- 中澤俊幸, 山口昭一, 蓮田常雄, 藤井光治郎 (1998): 地下鉄道近傍に立地する免震建物の振動伝搬特性(その 1) 工事進捗に伴う振動伝搬の実態, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.241-242
- 濱口雅義, 武居泰, 蓮田常雄, 増子友介, 藤井光治郎, 柴田昭彦 (1999): 地平および地下鉄道に近接する建物の振動伝搬特性 - (その 2) 免震建物の工事進捗に伴う振動伝搬の実態 -, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.271- 272
- 藤井光治郎, 伊積康彦, 蓮田常雄, 中澤俊幸, 武居泰, 中川里 (1998): 地下鉄振動近傍に立地する免震建物の振動伝搬特性 - (その 2) 数値解析による検討 -, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.243-244
- 松岡明彦, 渡辺秀夫, 宮尾健一 (1999a): 免震構造の集合住宅における地下鉄からの固体伝搬低減効果について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.275-276
- 松岡明彦, 渡辺秀夫, 宮尾健一, 土屋祐造 (1999b): 鉄道振動に対する免震構造集合住宅の固体音低減, 日本音響学会講演論文集, pp.873-874
- 山川高史, 棚瀬廉人, 岸永伸二, 川上福司 (1999): 地盤から免震建物への固体音伝播性状, 日本音響学会研究発表会講演論文集, Vol.1999(1), pp.759-760

山岸邦彰, 野路利幸, 山中久幸, 岩本毅, 原田浩之, 嶋田泰 : 鉄道軌道に近接する免震建物の振動  
伝搬特性(その 1)~(その 4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.257-264, 2004

吉岡修, 芦谷公稔: (1995) : 新幹線鉄道振動の発生・伝播モデル, 物理探査, 第 48 卷, 第 5 号,  
pp.299-315

綿谷重規, 須賀昌昭, 大井尚志, 唐木卓哉 (2002) : 免震構造による地下鉄振動防止について, 日  
本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.147-148



## 第5章

### スラブの振動を利用した固体音の低減対策工法の提案

---

## 5.1 まえがき

本章では、建物の躯体を利用した固体音の低減対策工法の 1 つを提案することを目的として、スラブの振動を利用した低減対策工法について述べる。

第 3 章で述べたように、固体音領域における建物内の振動伝搬特性を精度良く予測するためには、柱・壁等の鉛直支持部材のモデル化に加えて、住戸内のスラブやバルコニー等（本章では、これらをまとめてスラブと呼ぶ）の上下方向に振動する部材の振動特性を反映させることが重要であることが分かった。また、スラブが振動することによる副次的な効果として、これらの部材の固有振動数付近で建物の応答が低減されることが、実測的にも解析的にも明らかとなった。すなわち、これらの部材が TMD としての特性を有することが分かった。このような部材を積極的に利用することにより、固体音領域における振動低減に対する一定の効果を期待できるものと推測される。なお、本論文では振動の低減を目的として振動数などを調整することのできるスラブ、廊下、バルコニー、庇等の部材を TMD 部材と呼ぶことにする。

そこで、本章では第 3 章で述べた低層建物と高層建物を対象として、このような TMD 部材を各階に配置した場合の振動低減効果について述べる。また、比較のために一般的な TMD と同様に、TMD 部材を建物の頂部に集中的に配置した場合の振動低減効果についても述べる。5.2 節では、低層建物を対象とした TMD 部材による振動低減効果について述べる。本論文で述べる低層建物のような場合には、地下鉄振動などで卓越する約 30~60Hz の振動数領域と上下方向の 1 次固有振動数とが一致する可能性がある。そこで、低層建物については上下方向の 1 次固有振動数の伝達率を低減させることを目的として TMD 部材の振動数を調整する。5.3 節では、高層建物を対象とした TMD 部材による振動低減効果について述べる。前述の低層建物と異なり、地下鉄振動などで卓越する振動数領域は高層建物の高次のモード振動数に相当する。これまでの実測結果から高次モードの伝達率は 1 次モードの伝達率と比較して小さく、固体音が増幅する可能性は低い。そこで、問題となる固体音の卓越振動数を 50, 60Hz と仮定して、これらの振動数の振動を積極的に低減することを目的として振動数を 50, 60Hz に調整した TMD 部材による振動低減効果を確認する。

5.4 節では、結びとして第 5 章のまとめを記す。

## 5.2 TMD部材による低層建物の振動低減効果

### 5.2.1 解析対象建物の概要と解析パラメータ

#### (1) 解析対象建物の概要

図 5.1に解析対象の低層建物の概略図を示す。この低層建物は第3章で述べた4階建て建物と基本的に同一である。ここでは、TMD部材をバルコニーおよび最上階の底とする。ただし、既存の対象建物は意匠計画上バルコニーが小さいため、本解析では比較的大きなバルコニーが東側妻面にあるものと想定する。また、屋上階の底については一般階のバルコニーと同等の底があると想定する。付加したバルコニーおよび底の位置を図 5.1 (b)の斜線部分で示す。バルコニーと底を付加した以外は既存の建物と同一である。

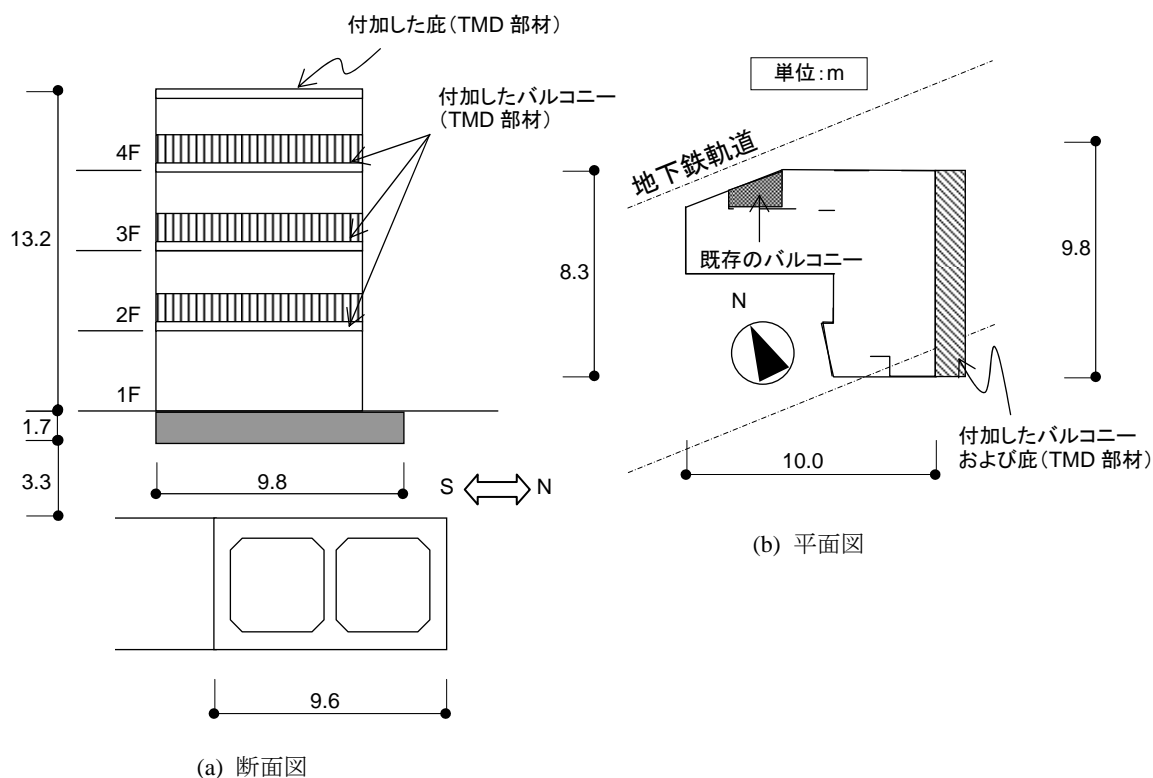


図 5.1 解析対象の低層建物の概略図

#### (2) 解析パラメータ

表 5.1および表 5.2に解析ケースおよび解析パラメータを示す。TMD部材を各階に配置する場合をCASE I, 比較のためにTMD部材を建物の頂部に集中して設置する場合をCASE IIとする。固体音は鉄道振動の卓越振動数に影響されるため、低減させるべき振動数領域は状況により異なる。地下鉄振動の場合、一般的に30~60Hz付近が卓越することから、この振動数領域の振動低減を

図ることを目的とする。ただし、本建物は上下方向の卓越振動数が約 55Hzであることから、ここでは 55Hz付近の振動低減を目的とする。

TMD部材の基数に応じてCASE IをCASE I-1～3に分類する。CASE I-1はTMD部材を各階に1基設置した場合であり、TMD部材の固有振動数を55Hzとする。なお、TMD部材であるバルコニーや庇は面材であることからそれらの振動モードに対応して複数の固有振動数を有するが、以下では有効質量の大きい1次固有振動数のみを対象とする。さらに、当該階の全質量に対するTMD部材の有効質量の比をパラメータとして、4種類の質量比(0.010, 0.020, 0.050, 0.10)を設定する。CASE I-2はTMD部材を2基設置した場合であり、TMD部材の固有振動数を55Hzと48Hzとする。固有振動数を48Hzに設定する理由は、CASE I-1の解析結果から新たに48Hz付近に伝達率のピークが見られたことから、この振動数付近の伝達率を低減するためである。CASE I-2もCASE I-1と同様に4種類の有効質量比を設定する。ただし、2基のTMD部材の有効質量の和がそれぞれ設定した質量比になるように設定し、さらに55Hzと48Hzの各TMD部材の有効質量の比が2対1となるように設定する。CASE I-3はTMD部材を3基設置した場合であり、TMD部材の固有振動数を55Hz、48Hzおよび37Hzとする。新たに固有振動数37HzのTMD部材を設置する理由は、本建物は37Hz付近に伝達率のピークを有しているが、30Hz付近に地下鉄振動の卓越振動数が存在する場合もあるため、この振動数付近の伝達率を低減することも重要であると考えられるからである。CASE I-3もCASE I-2と同様に4種類の質量比を設定し、3基のTMD部材の有効質量の和がそれぞれ設定した質量比になるように設定する。各TMD部材の質量比は、55Hzと他の振動数の各TMD部材の有効質量の比が1対1となるように設定して、さらに37Hzと48HzのTMD部材の有効質量の比が1対1となるように設定する。図5.2にCASE Iを想定したバルコニーおよび庇の配置例を示す。図中の斜線部分の面積比がTMD部材の質量比を表している。

CASE IIもCASE Iと同様にTMD部材の基数に応じてCASE II-1～3に分類する。CASE II-1はTMD部材を1基設置した場合であり、TMD部材の固有振動数を55Hzとする。また、1階壁の質量の半分と2階以上の質量の和に対するTMD部材の有効質量の比をパラメータとして、4種類の質量比(0.010, 0.020, 0.050, 0.10)を設定する。CASE I-2はTMD部材を2基設置した場合であり、TMD部材の固有振動数を55Hzと48Hzとする。固有振動数を48Hzに設置する理由は、CASE I-2の設定理由と同じである。CASE II-2もCASE II-1と同様に4種類の有効質量比を設定するが、2基のTMD部材の有効質量の和が1基の場合と同一の質量比になるように設定し、55Hzと48Hzの各TMD部材の質量比が2対1となるように設定する。CASE II-3はTMD部材を3基設置した場合であり、TMD部材の固有振動数を55Hz、48Hzおよび37Hzとする。有効質量比を設定方法はCASE I-3に倣うものとする。

図5.3および図5.4に解析モデルの模式図を示す。TMD部材を設置していない解析モデルは第3章の解析モデルと同一である。

なお、CASE I-1を除きTMD部材の減衰定数を一律に $h_{TMD}=0.07$ とした。CASE I-1については



TMD 部材の減衰の影響を把握するため、 $h_{TMD}=0.07$  のほかに  $h_{TMD}=0.12, 0.20$  としたモデルについても検討する。

表 5.1 TMD 部材の設定パラメータ(CASE I)

| CASE 名   | 各階 TMD 部材<br>基数 | TMD 部材<br>振動数(Hz) | TMD 部材の有効質量比 |        |       |       | TMD 部材の<br>減衰定数 |
|----------|-----------------|-------------------|--------------|--------|-------|-------|-----------------|
|          |                 |                   | (a)          | (b)    | (c)   | (d)   |                 |
| CASE I-1 | 1               | 55                | 0.010        | 0.020  | 0.050 | 0.10  | 0.07            |
|          |                 |                   |              |        |       |       | 0.12            |
|          |                 |                   |              |        |       |       | 0.20            |
| CASE I-2 | 2               | 55                | 0.0067       | 0.013  | 0.033 | 0.067 | 0.07            |
|          |                 | 48                | 0.0033       | 0.067  | 0.017 | 0.033 | 0.07            |
| CASE I-3 | 3               | 55                | 0.0050       | 0.010  | 0.025 | 0.050 | 0.07            |
|          |                 | 48                | 0.0025       | 0.0050 | 0.013 | 0.025 | 0.07            |
|          |                 | 37                | 0.0025       | 0.0050 | 0.013 | 0.025 | 0.07            |

表 5.2 TMD 部材の設定パラメータ(CASE II)

| CASE 名    | 頂部 TMD 部材<br>基数 | TMD 部材<br>振動数(Hz) | TMD 部材の有効質量比 |        |       |       | TMD 部材の<br>減衰定数 |
|-----------|-----------------|-------------------|--------------|--------|-------|-------|-----------------|
|           |                 |                   | (a)          | (b)    | (c)   | (d)   |                 |
| CASE II-1 | 1               | 55                | 0.010        | 0.020  | 0.050 | 0.10  | 0.07            |
| CASE II-2 | 2               | 55                | 0.0067       | 0.013  | 0.033 | 0.067 | 0.07            |
|           |                 | 48                | 0.0033       | 0.067  | 0.017 | 0.033 | 0.07            |
| CASE II-3 | 3               | 55                | 0.0050       | 0.010  | 0.025 | 0.050 | 0.07            |
|           |                 | 48                | 0.0025       | 0.0050 | 0.013 | 0.025 | 0.07            |
|           |                 | 37                | 0.0025       | 0.0050 | 0.013 | 0.025 | 0.07            |

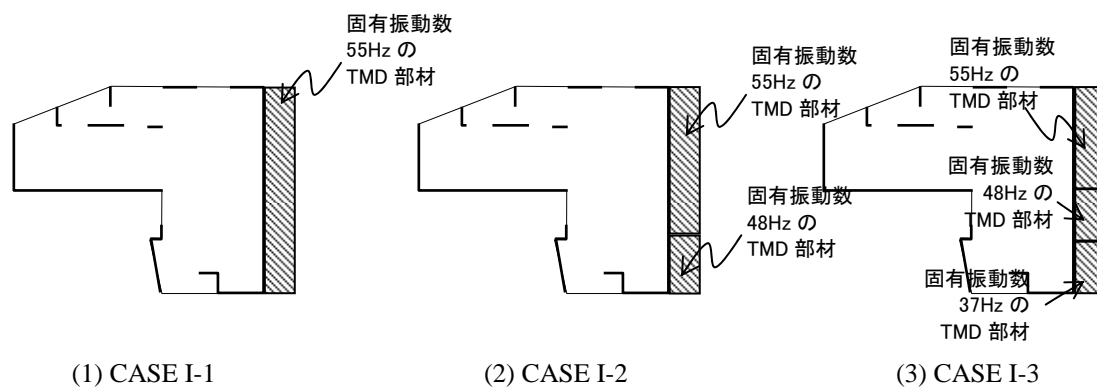


図 5.2 CASE I のバルコニーおよび底の配置例

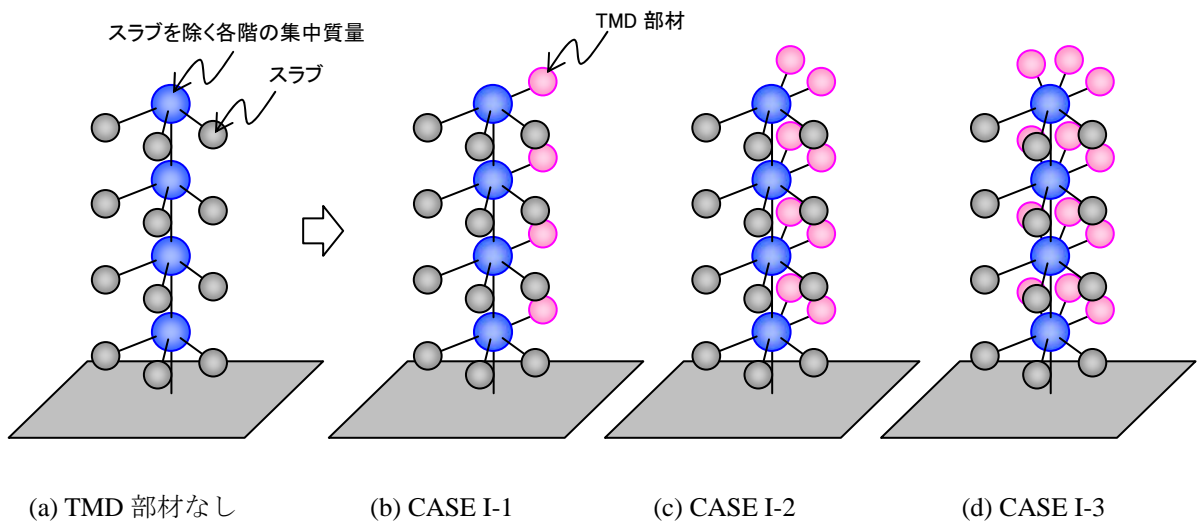


図 5.3 低層建物各階に TMD 部材を配置した場合の解析モデル(CASE I)

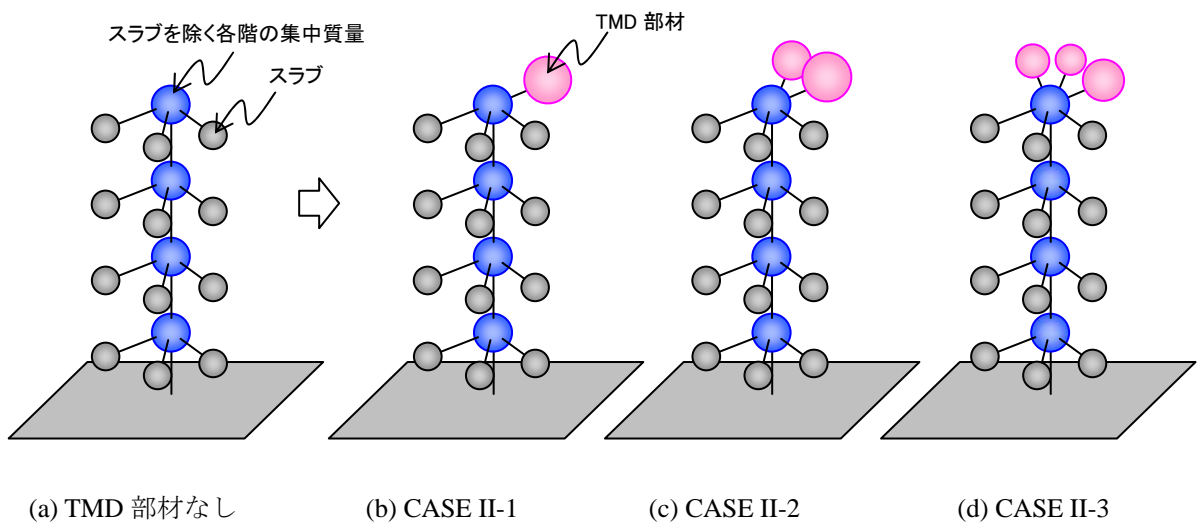


図 5.4 低層建物の頂部に TMD 部材を配置した場合の解析モデル(CASE II)

## 5.2.2 低層建物の解析結果

### (1) CASE I

以下では、振動低減効果について 1 階に対する各階の壁際およびスラブ中央における伝達率で評価する。ここで、壁際およびスラブ中央とは図 5.5 における黒丸の位置を指す。スラブ中央における伝達率は、1 階床位置に対するスラブの 1 次振動モードを模擬した質点系モデルの質点位置の応答倍率とし、式(5-1)で表現される。なお、式中の記号については第 3 章を参照されたい。

$$T_{Bik11} = \left| -\omega^2 Y_{ik11} + 1 \right| \quad (5-1)$$

ここに、 $Y_{ik11}$  は式(5-2)で表現される。

$$Y_{ik11} = \frac{(ks_{ik11} + i\omega c_{ik11})Y_i - m_{ik11}}{-m_{ik11}\omega^2 + i\omega c_{ik11} + ks_{ik11}} \quad (5-2)$$

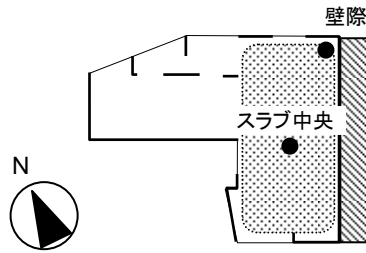


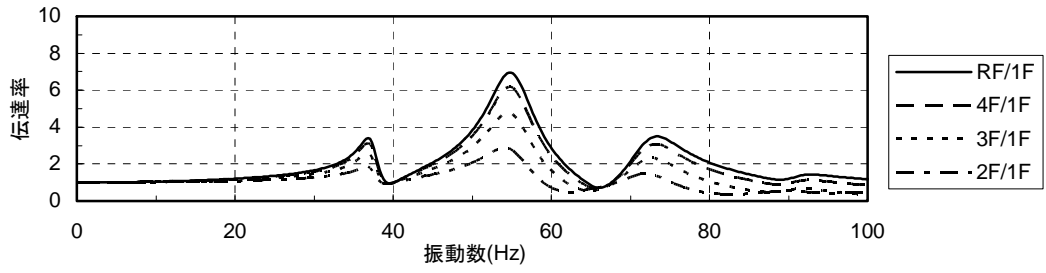
図 5.5 伝達率を評価するポイント

図 5.6にCASE I-1 の 1 階に対する各階の壁際における伝達率, 図 5.7に同じくCASE I-1 の 1 階に対する各階のスラブ中央における伝達率をそれぞれ示す。各図とも(a)にTMD部材なしの結果, (b)に有効質量比 0.010, (c)に同比 0.020, (d)に同比 0.050 および(e)に同比 0.10 の各結果を示している。本章に示す以下の図もこの表示方法に倣う。壁際における伝達率については, TMD部材の有効質量比が大きくなるにしたがい 55Hz付近の伝達率が低下しており, 振動低減効果を確認することができる。また, TMD部材の有効質量比が大きくなるにしたがい, 48Hz付近では伝達率が若干大きくなるとともに, TMD部材がない場合の 73Hz付近の伝達率のピークが高振動数側に移動する。スラブ中央における伝達率については, 37Hz付近にスラブの 1 次固有モードのピークが見られ, TMD部材の有効質量比が大きくなるにしたがい 55Hz付近の伝達率は小さくなるが, 55Hzより低振動数側では逆に若干大きくなっている。

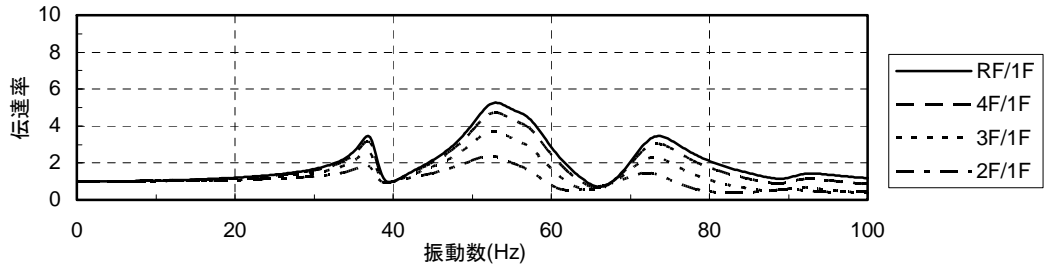
また, 図 5.8にCASE I-1 の有効質量比の違いによるTMD部材がない場合の伝達率に対するTMD部材を配置した場合の伝達率の比 (以下, TMD部材の有無による低減率) を示す。1 より小さい領域はTMD部材を配置したことにより振動低減効果が得られている領域であり, 逆に 1 より大きい領域は振動が増幅していることを意味する。これらの図より, 有効質量比が大きくなるにしたがい, 55Hz付近の振動低減効果は顕著となるが, 他の振動数領域では逆に増幅している領域も見られる。特に, 有効質量比が 0.10 の場合は, 62Hz付近で伝達率が 1.7 となっている。また, 階に対しては 55Hz付近の振動低減効果はほぼ同等であるが, 増幅される振動数領域は低い階の方が大きくなる傾向が見られる。

図 5.9, 図 5.12にCASE I-2 およびCASE I-3 の 1 階に対する各階の壁際における伝達率, 図 5.10, 図 5.13に同じくCASE I-2 およびCASE I-3 の 1 階に対する各階のスラブ中央における伝達率, 図

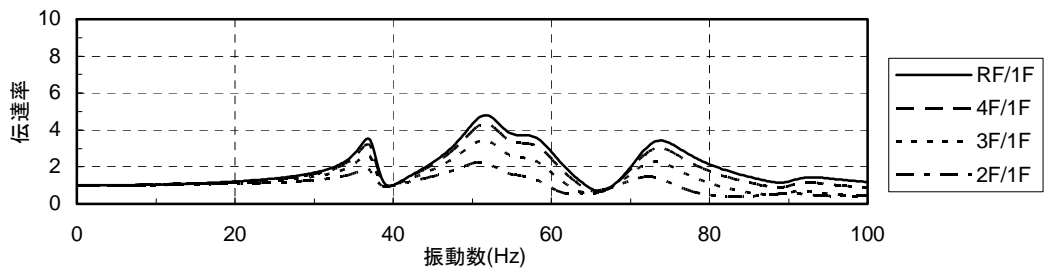
5.11, 図 5.14にCASE I-2 およびCASE I-3 の有効質量比の異なるTMD部材の有無による低減率の比をそれぞれ示す。CASE I-2 では 55Hz付近の振動低減効果は若干低下するものの, 他の振動数領域における伝達率の増幅が抑制されている様子が分かる。さらに, CASE I-3 ではこれらの傾向がやや大きくなっている様子が分かる。



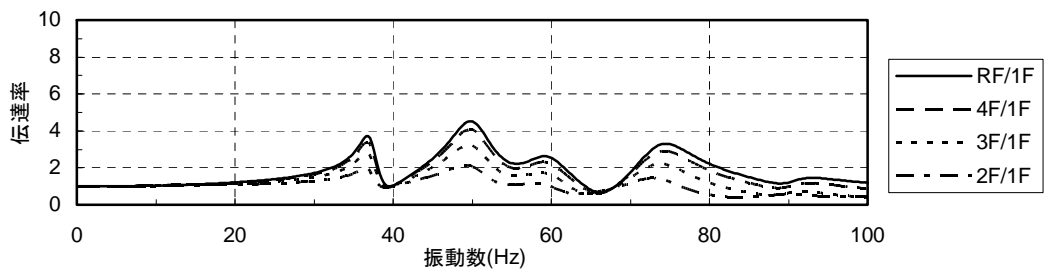
(a)TMD部材なし



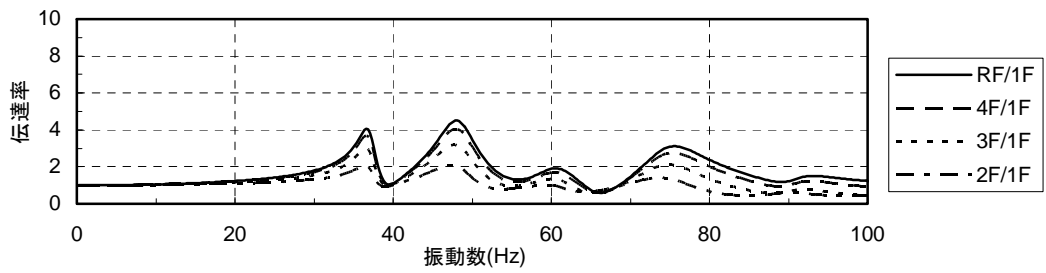
(b)有効質量比0.010



(c)有効質量比0.020

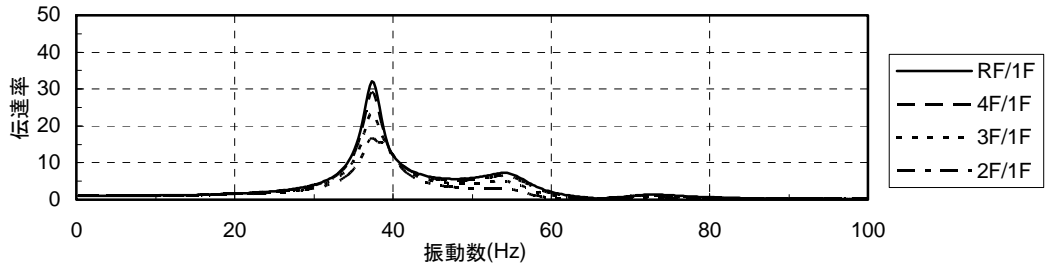


(d)有効質量比0.050

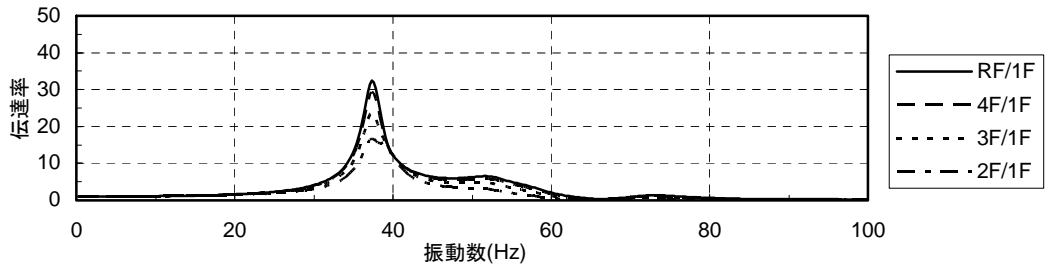


(e)有効質量比0.10

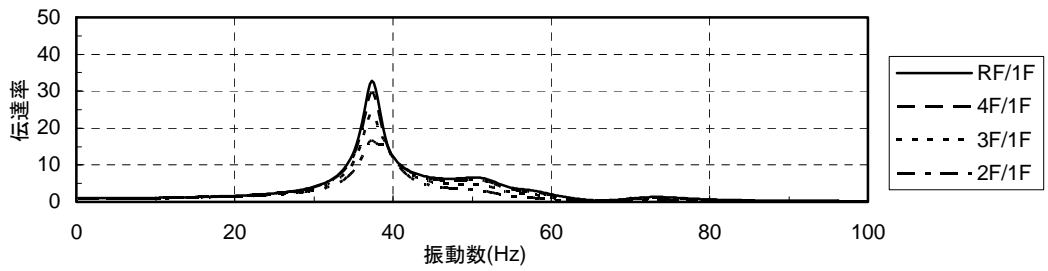
図 5.6 1階に対する各階の壁際の伝達率(CASE I-1)



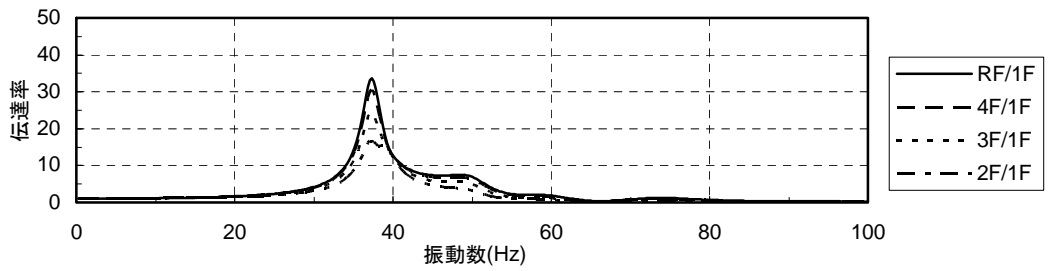
(a)TMD部材なし



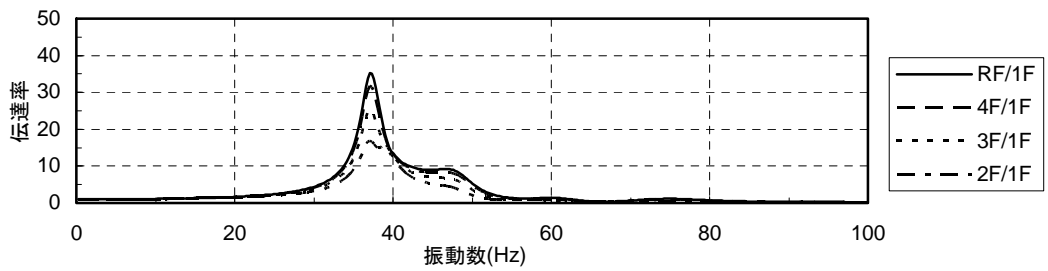
(b)有効質量比0.010



(c)有効質量比0.020

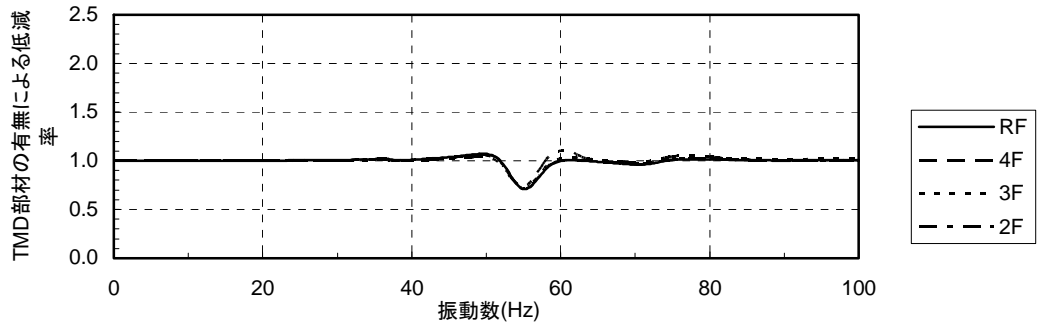


(d)有効質量比0.050

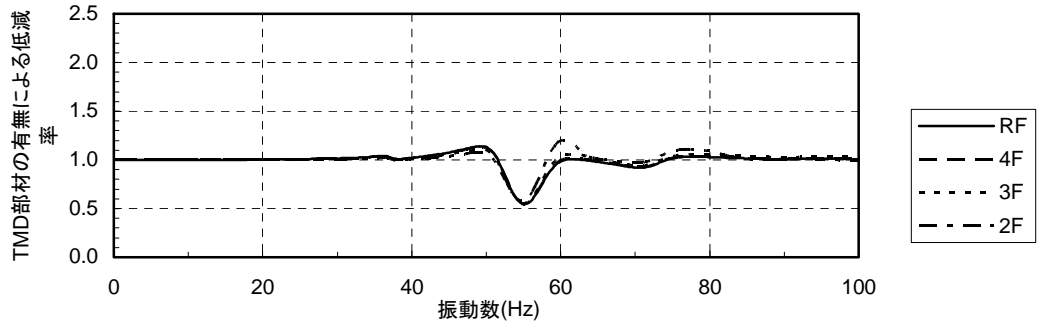


(e)有効質量比0.10

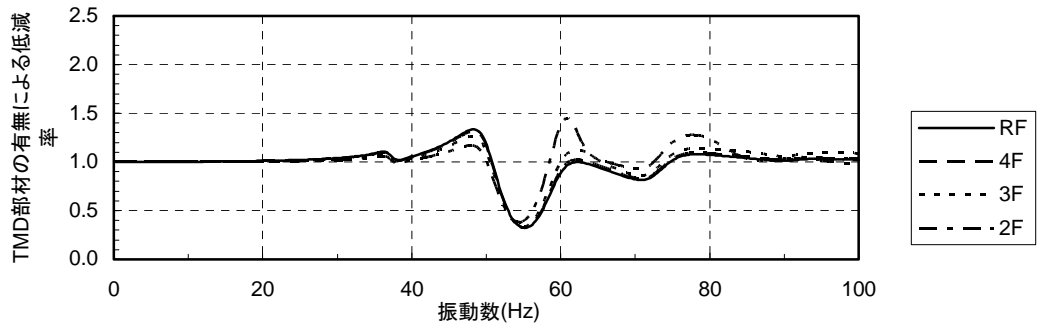
図 5.7 1階に対する各階のスラブ中央の伝達率(CASE I-1)



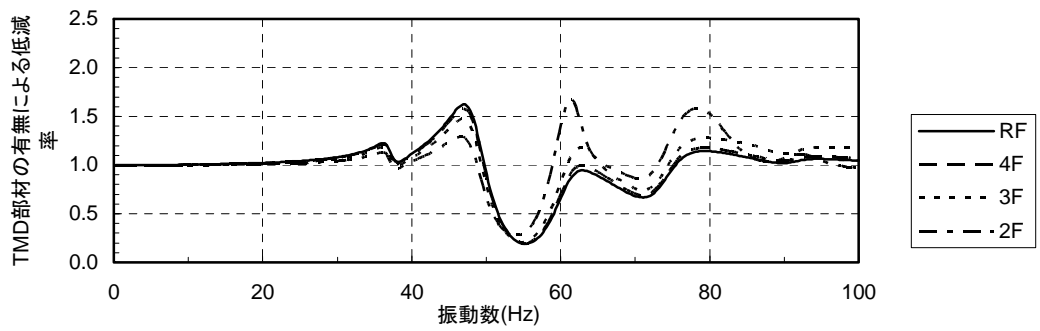
(a)有効質量比0.010



(b)有効質量比0.020

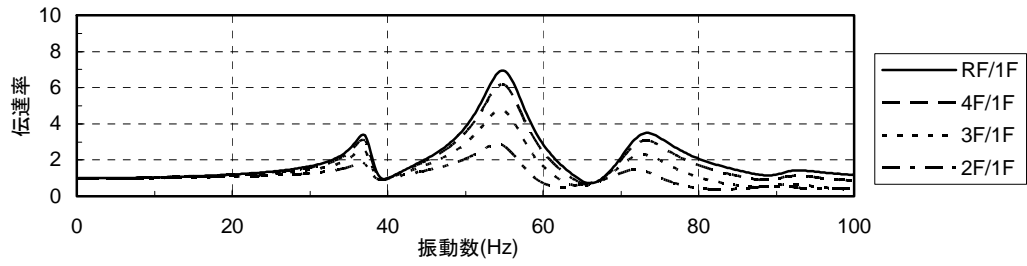


(c)有効質量比0.050

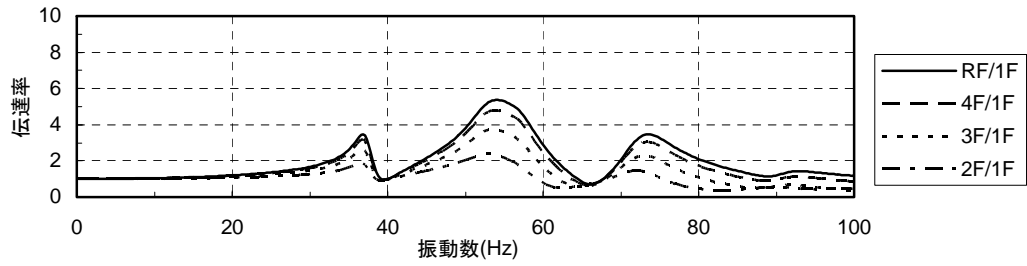


(d)有効質量比0.10

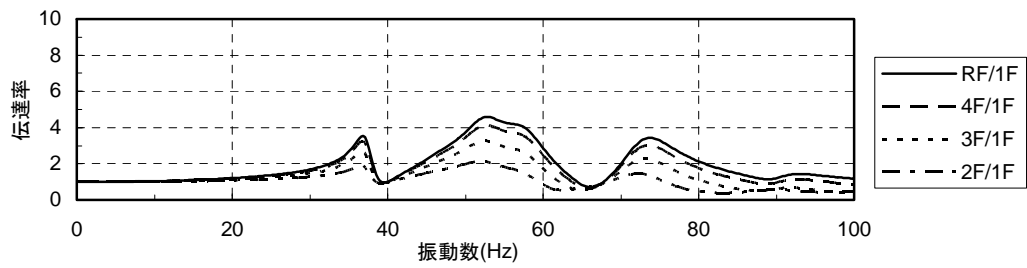
図 5.8 有効質量比の異なる TMD 部材の有無による低減率(CASE I-1)



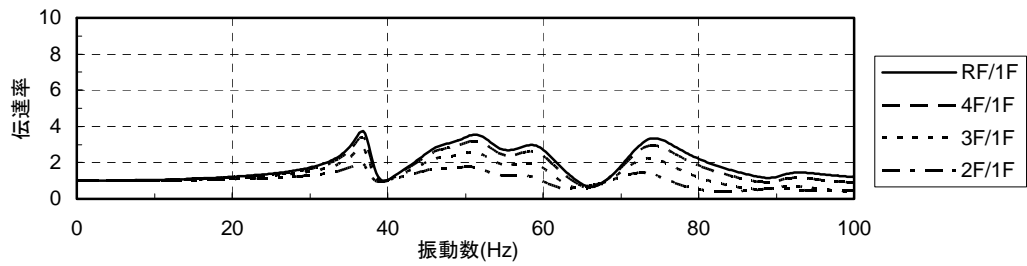
(a)TMD部材なし



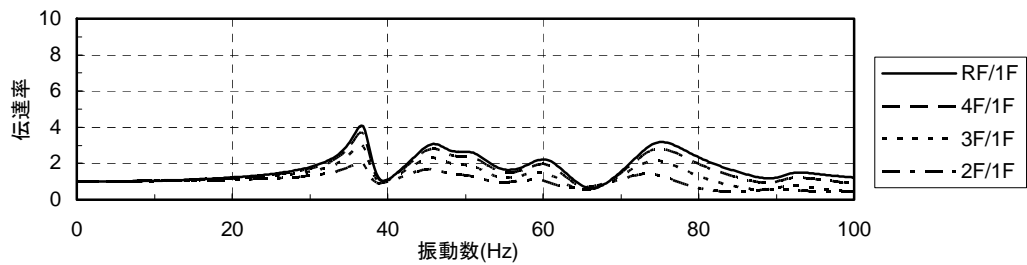
(b)有効質量比0.010



(c)有効質量比0.020



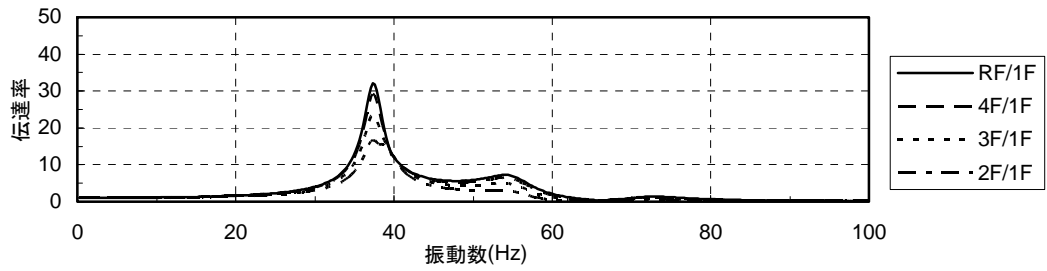
(d)有効質量比0.050



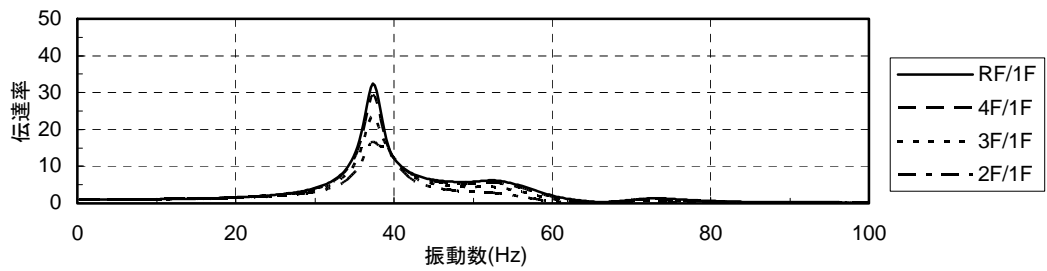
(e)有効質量比0.10

図 5.9 1階に対する各階の壁際の伝達率(CASE I-2)

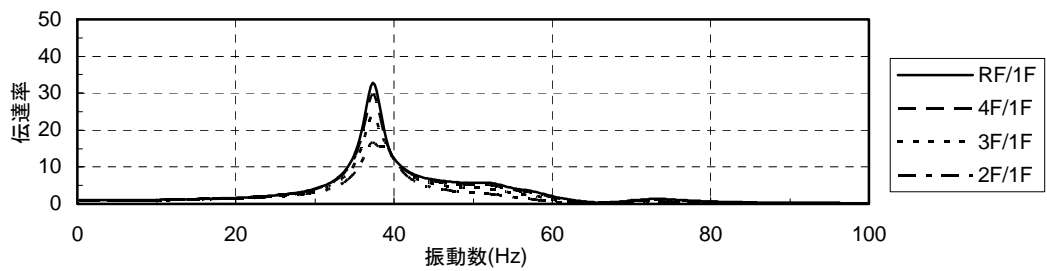




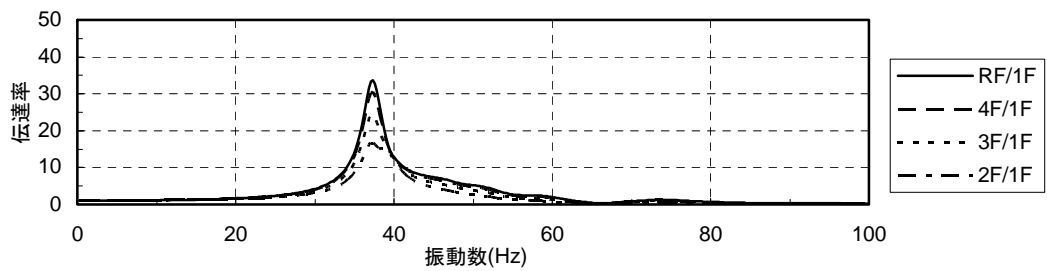
(a)TMD部材なし



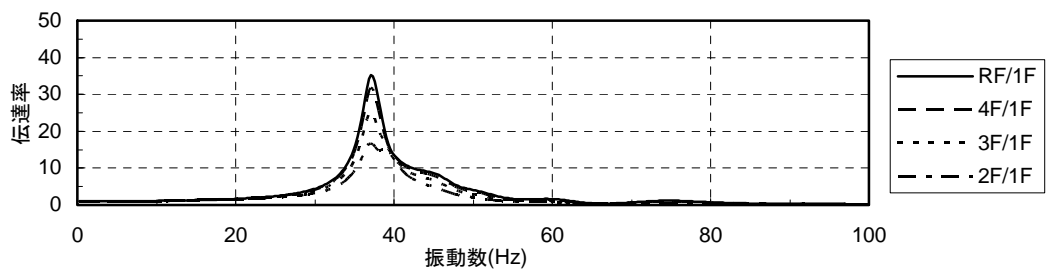
(b)有効質量比0.010



(c)有効質量比0.020

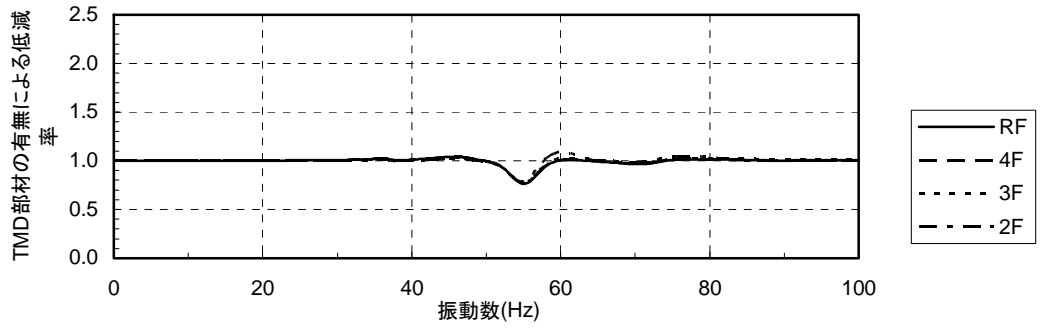


(d)有効質量比0.050

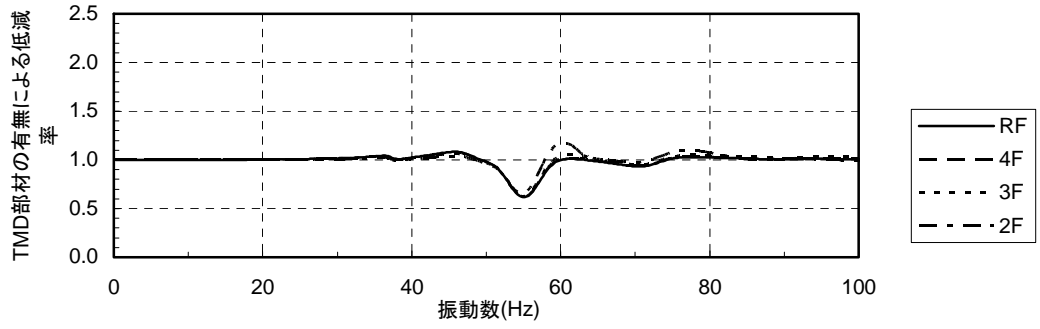


(e)有効質量比0.10

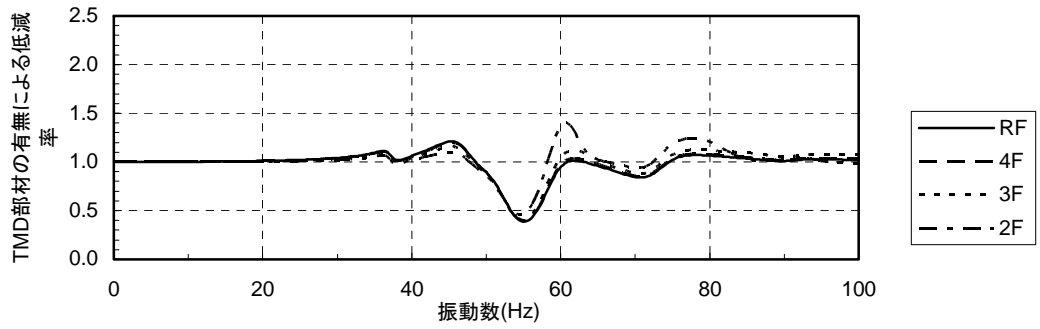
図 5.10 1階に対する各階のスラブ中央の伝達率(CASE I-2)



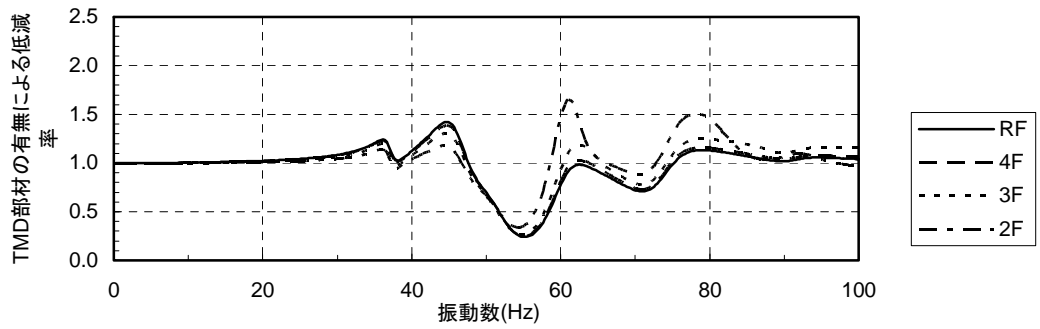
(a)有効質量比0.010



(b)有効質量比0.020

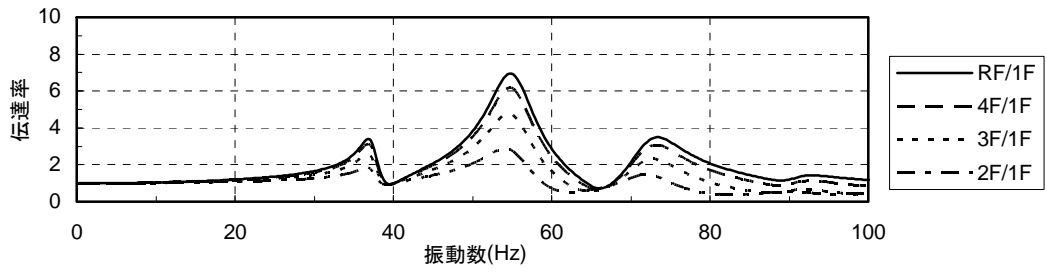


(c)有効質量比0.050

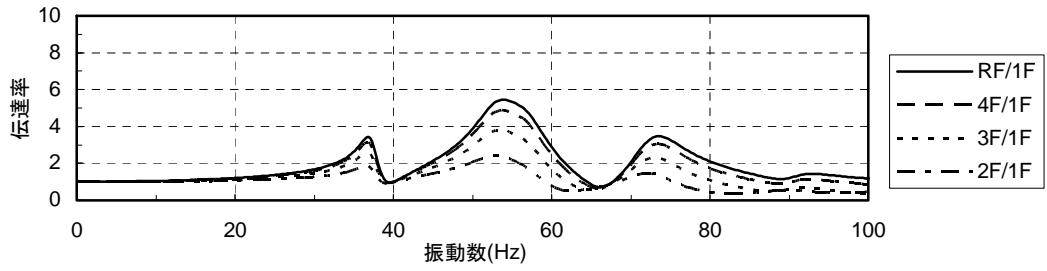


(d)有効質量比0.10

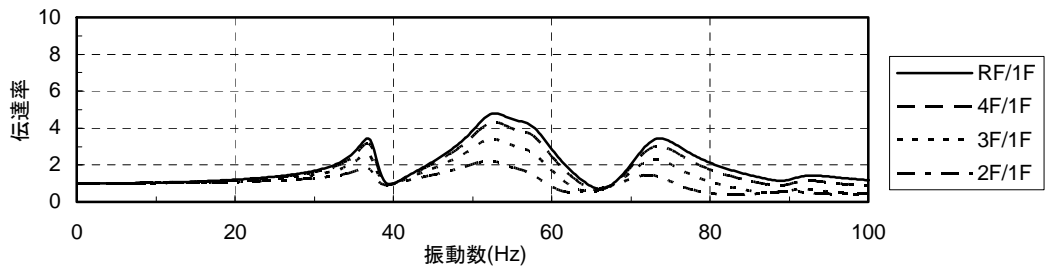
図 5.11 有効質量比の異なる TMD 部材の有無による低減率(CASE I-2)



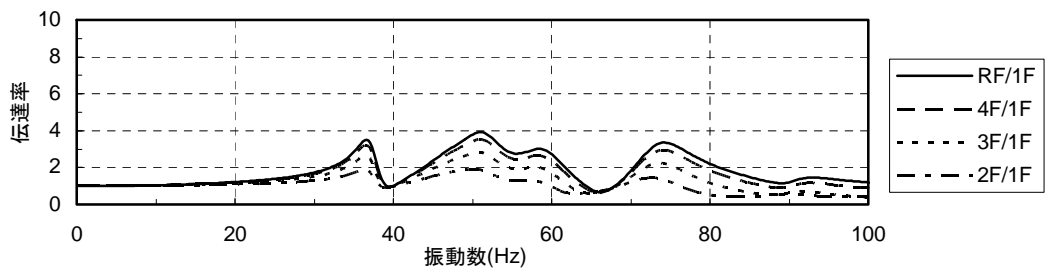
(a)TMD部材なし



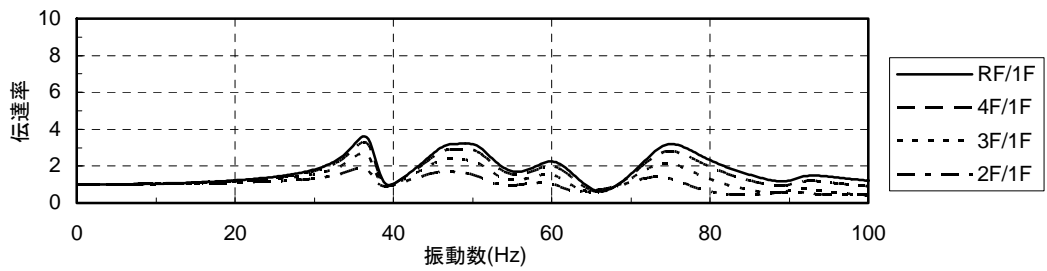
(b)有効質量比0.010



(c)有効質量比0.020

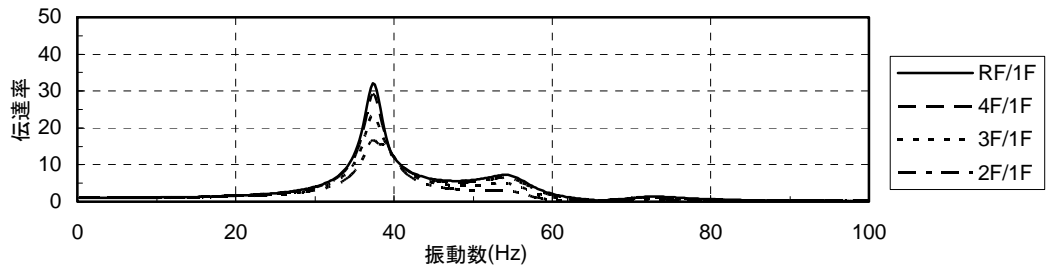


(d)有効質量比0.050

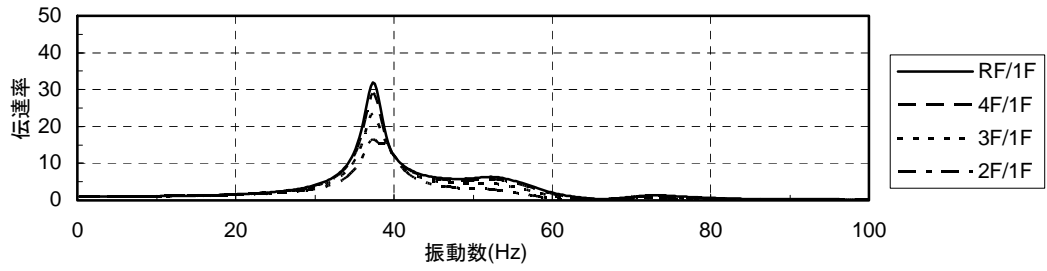


(e)有効質量比0.10

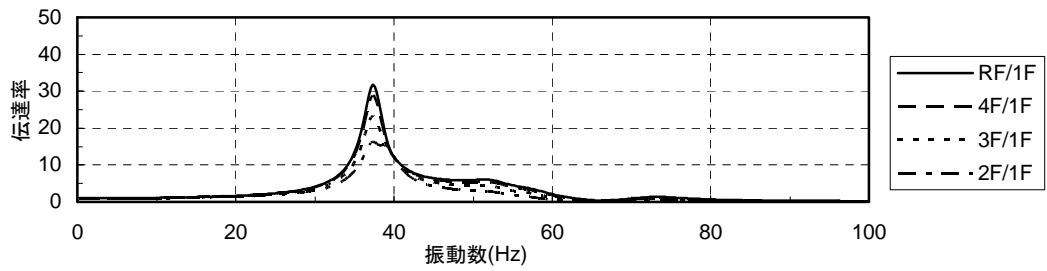
図 5.12 1階に対する各階の壁際の伝達率(CASE I-3)



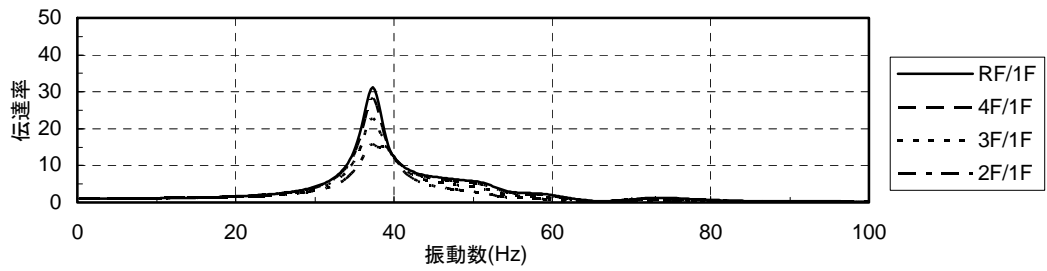
(a)TMD部材なし



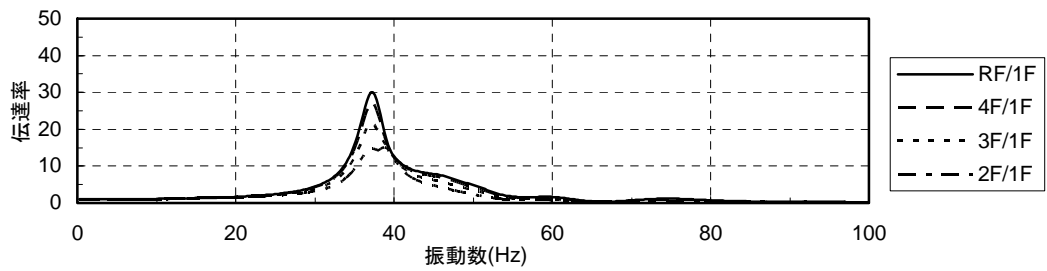
(b)有効質量比0.010



(c)有効質量比0.020

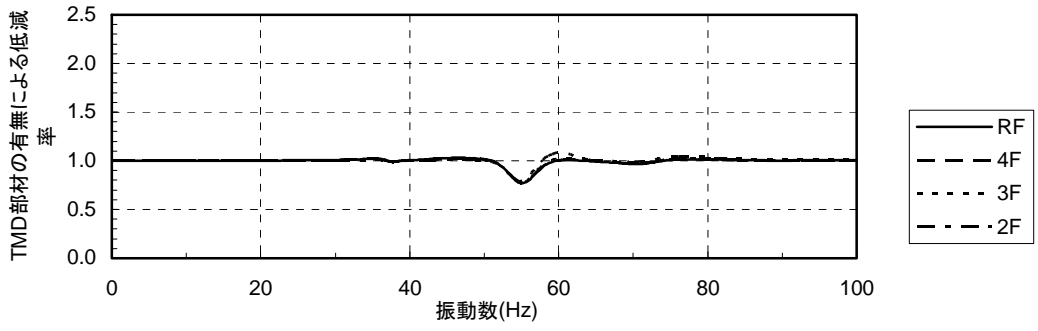


(d)有効質量比0.050

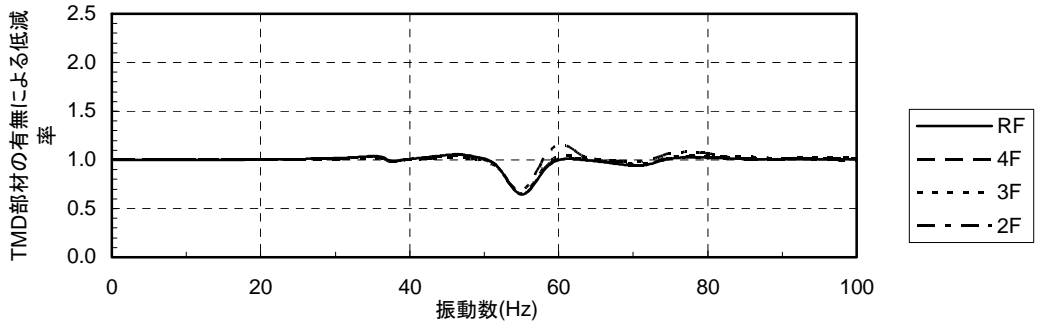


(e)有効質量比0.10

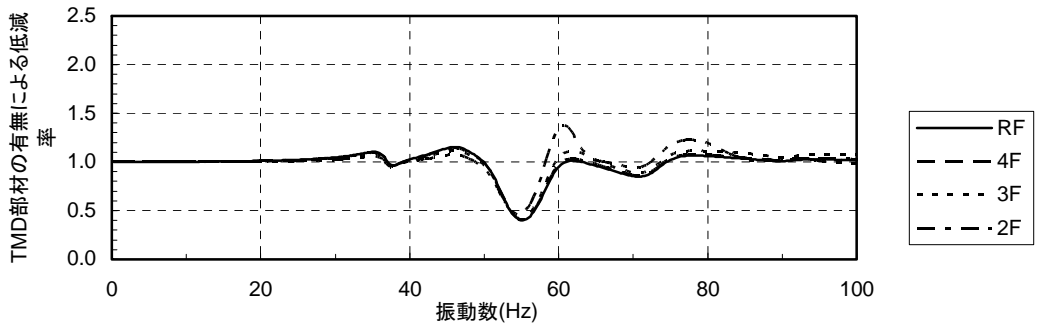
図 5.13 1階に対する各階のスラブ中央の伝達率(CASE I-3)



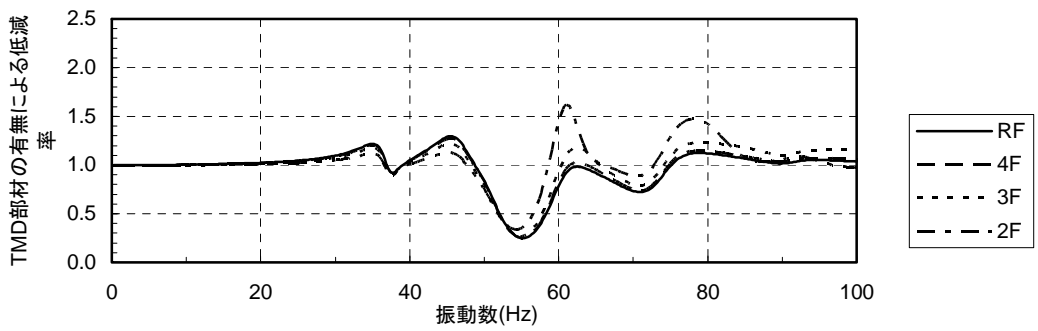
(a)有効質量比0.010



(b)有効質量比0.020



(c)有効質量比0.050



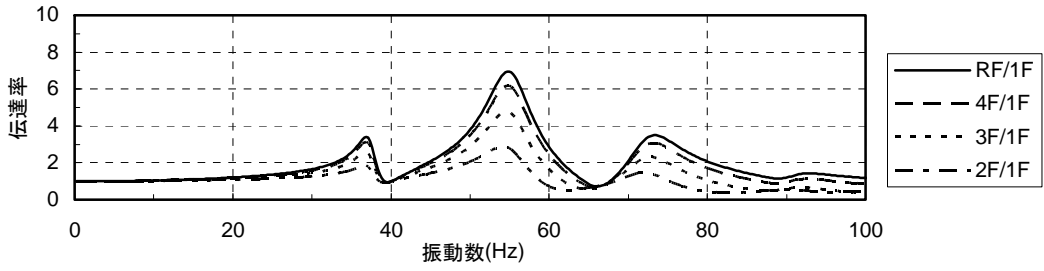
(d)有効質量比0.10

図 5.14 有効質量比の異なる TMD 部材の有無による低減率(CASE I-3)

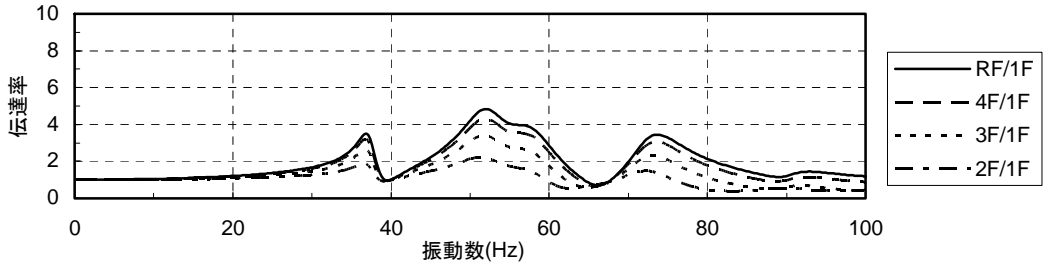
## (2) CASE II

図 5.15, 図 5.18, 図 5.21にCASE II-1, CASE II-2, CASE II-3 の 1 階に対する各階の壁際における伝達率, 図 5.16, 図 5.19, 図 5.22 にCASE II-1, CASE II-2, CASE II-3 の 1 階に対する各階のスラブ中央における伝達率, 図 5.17, 図 5.23, 図 5.26にCASE II-1, CASE II-2, CASE II-3 の有効質量比の異なるTMD部材の有無による低減率をそれぞれ示す。

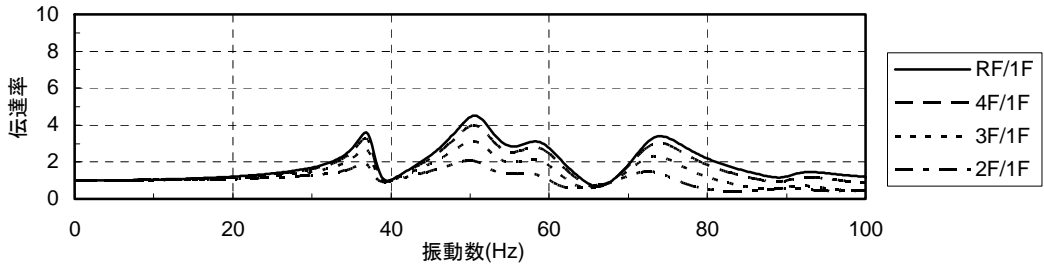
CASE Iと比較すると伝達率および振動低減効果の傾向は変わらないが, 伝達率の凹凸がやや顕著になっている。すなわち, TMD部材の質量が同じであれば, CASE IIの方が 55Hz付近の振動低減効果は大きく効率的であるが, 他の振動数領域における伝達率の増加も大きくなっている。特に, 図 5.17(d) の有効質量比が 0.10 の場合では, 2 階において約 62Hzと約 79Hzの伝達率の増幅が 2.3 程度となっている。



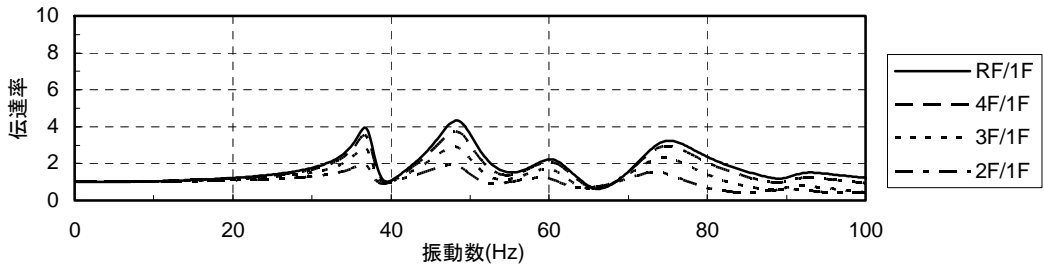
(a)TMD部材なし



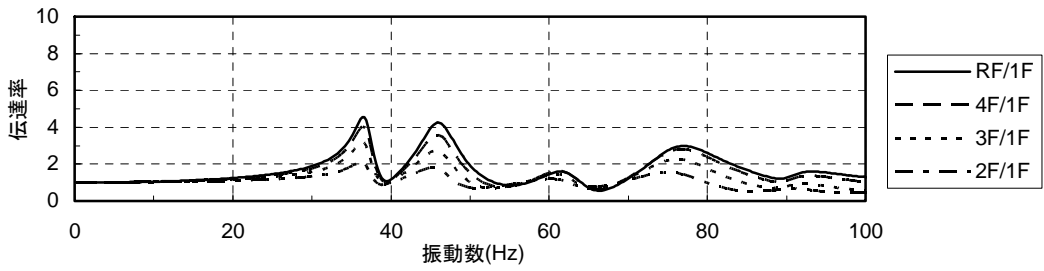
(b)有効質量比0.010



(c)有効質量比0.020

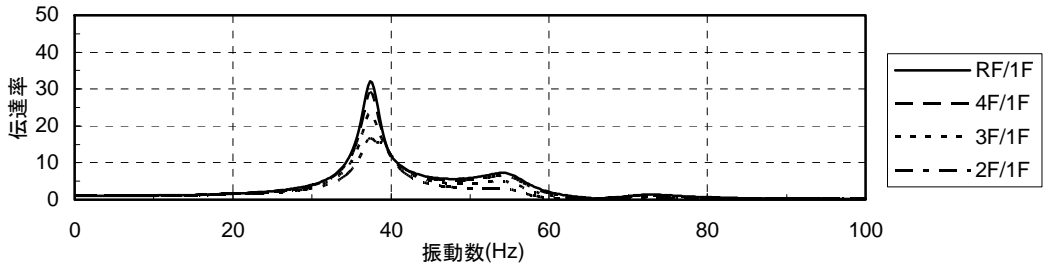


(d)有効質量比0.050

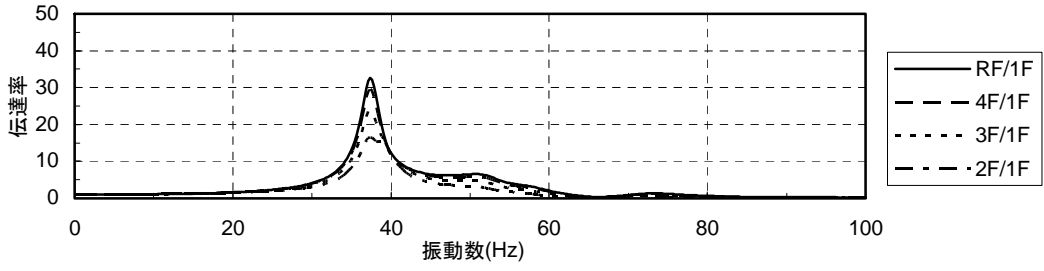


(e)有効質量比0.10

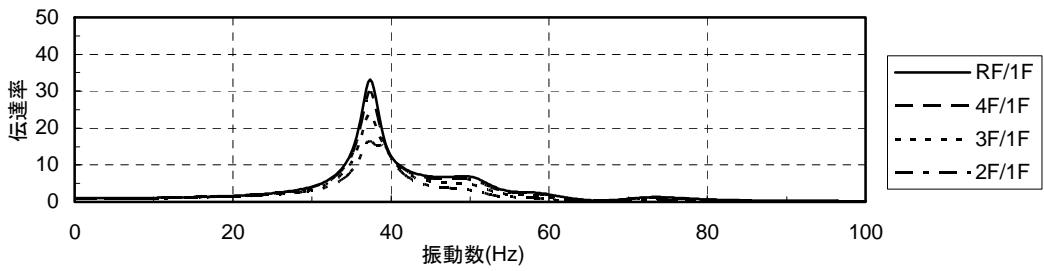
図 5.15 1階に対する各階の柱際の伝達率(CASE II-1)



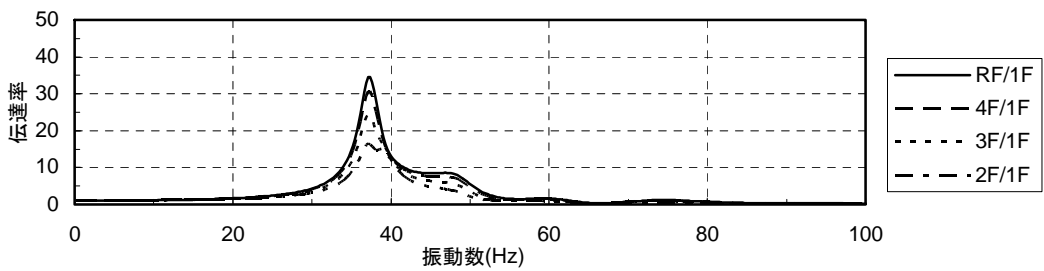
(a)TMD部材なし



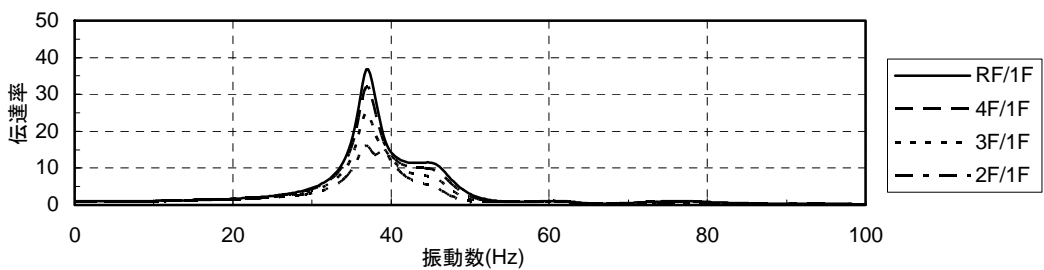
(b)有効質量比0.010



(c)有効質量比0.020



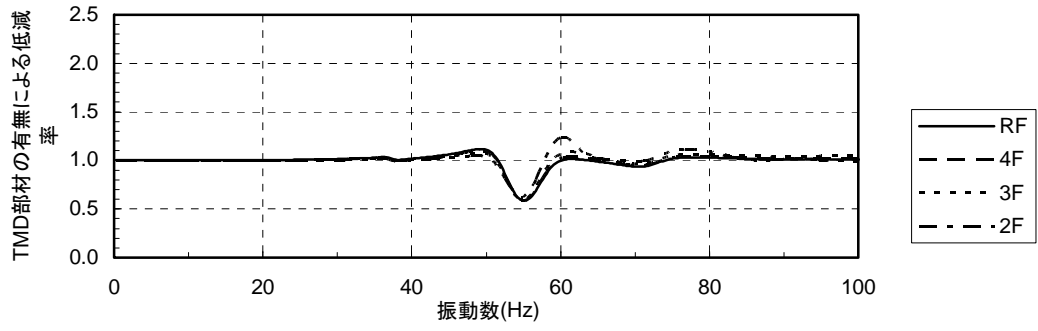
(d)有効質量比0.050



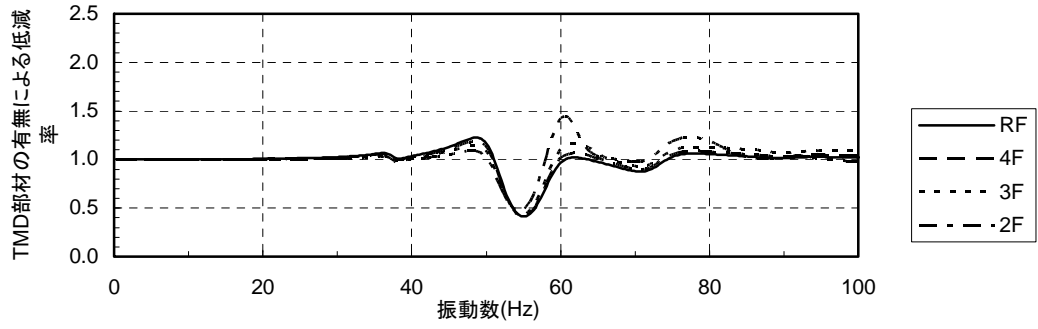
(e)有効質量比0.10

図 5.16 1階に対する各階のスラブ中央の伝達率(CASE II-1)

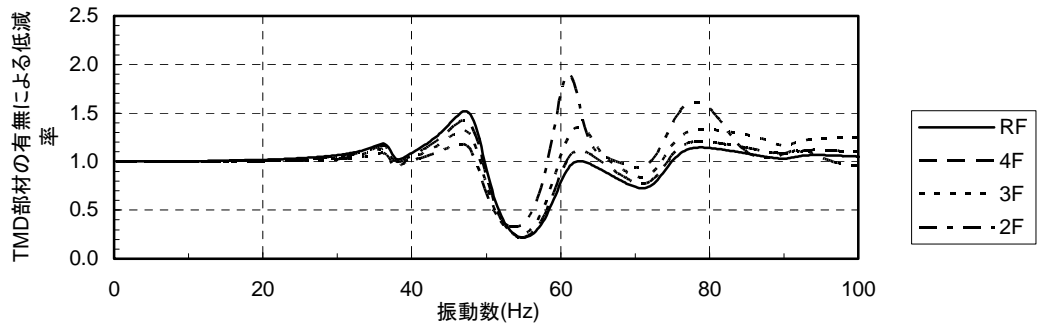




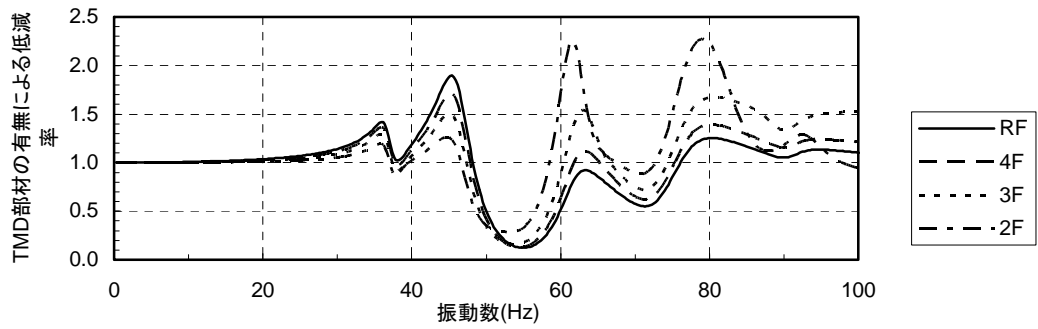
(a)有効質量比0.010



(b)有効質量比0.020

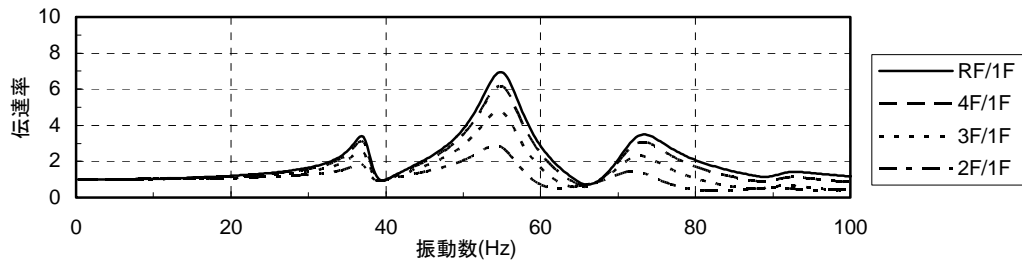


(c)有効質量比0.050

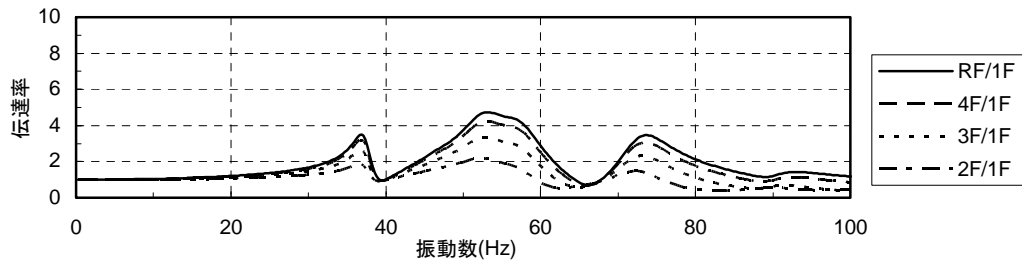


(d)有効質量比0.10

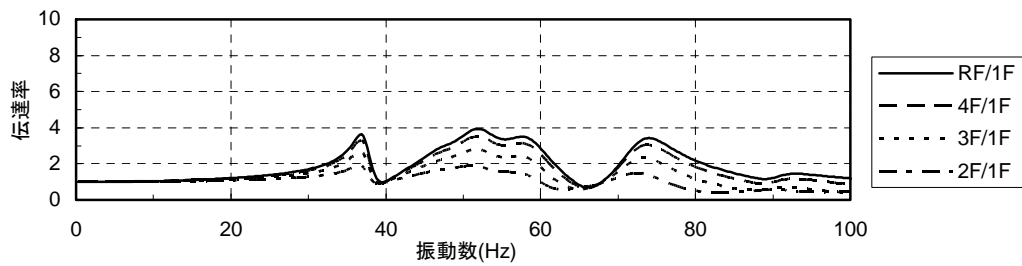
図 5.17 有効質量比の異なる TMD 部材の有無による低減率(CASE II-1)



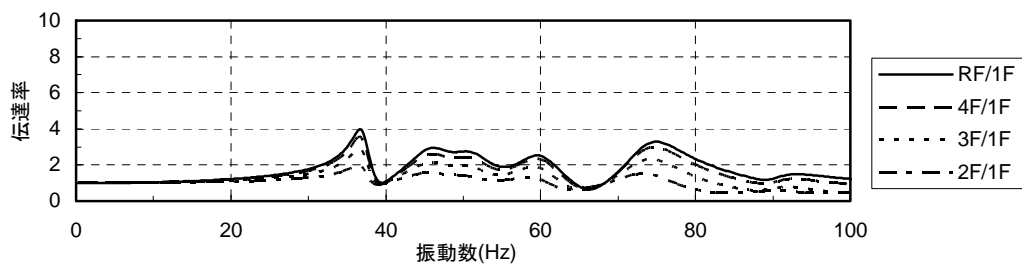
(a)TMD部材なし



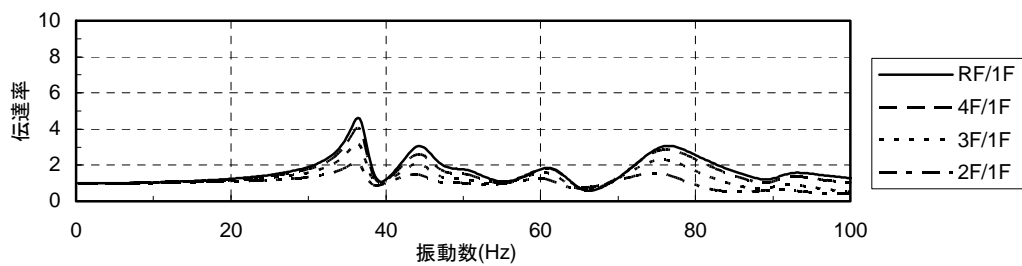
(b)有効質量比0.010



(c)有効質量比0.020

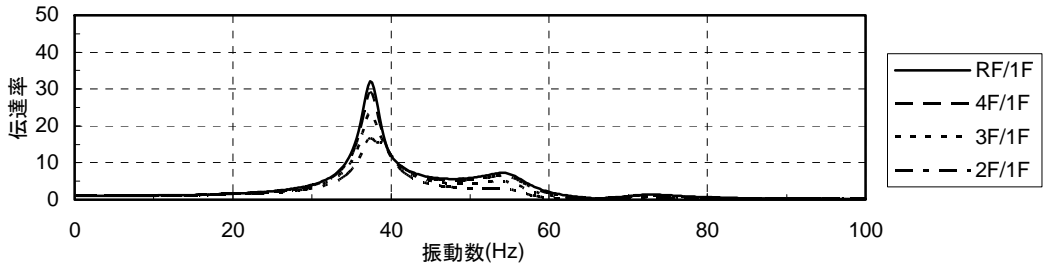


(d)有効質量比0.050

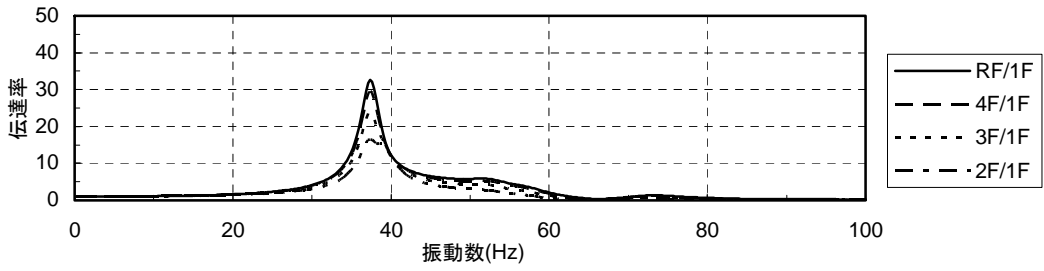


(e)有効質量比0.10

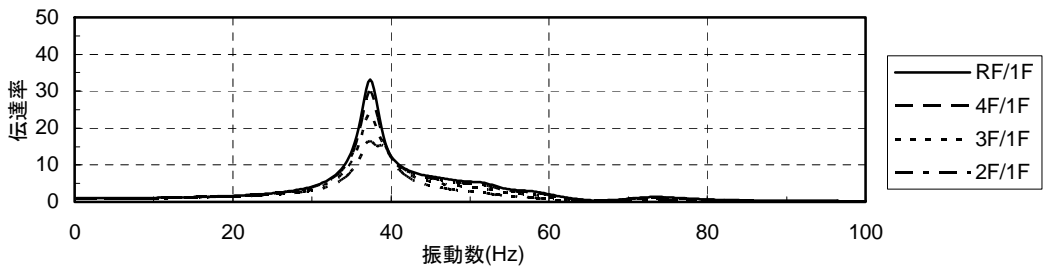
図 5.18 1階に対する各階の柱際の伝達率(CASE II-2)



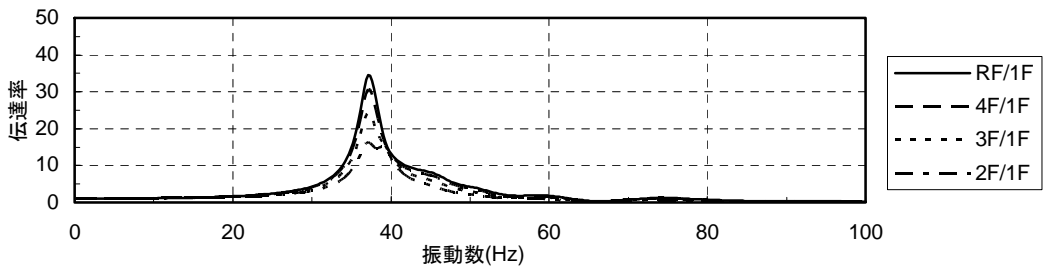
(a)TMD部材なし



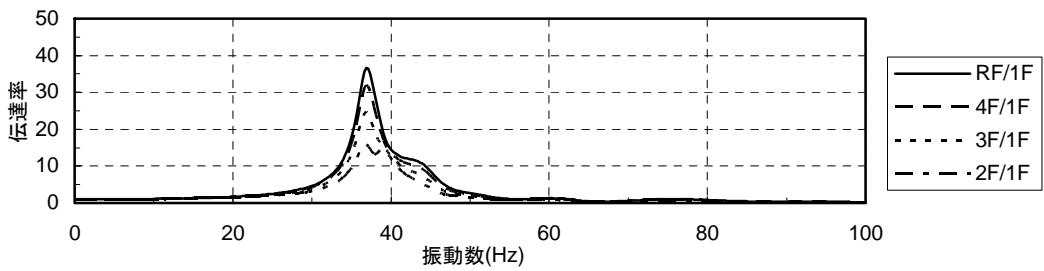
(b)有効質量比0.010



(c)有効質量比0.020

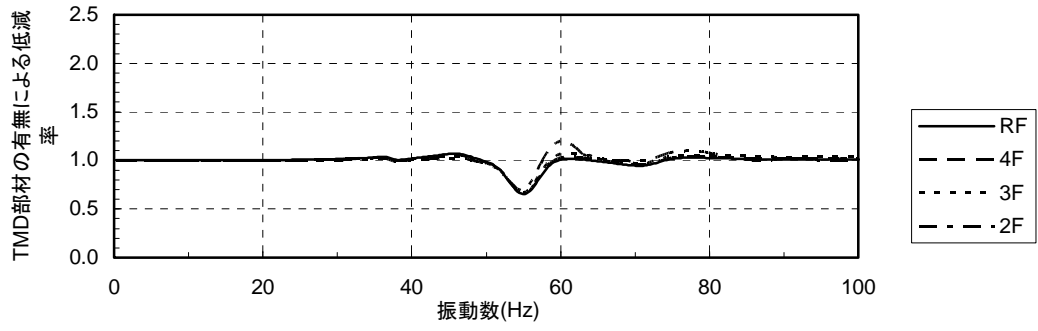


(d)有効質量比0.050

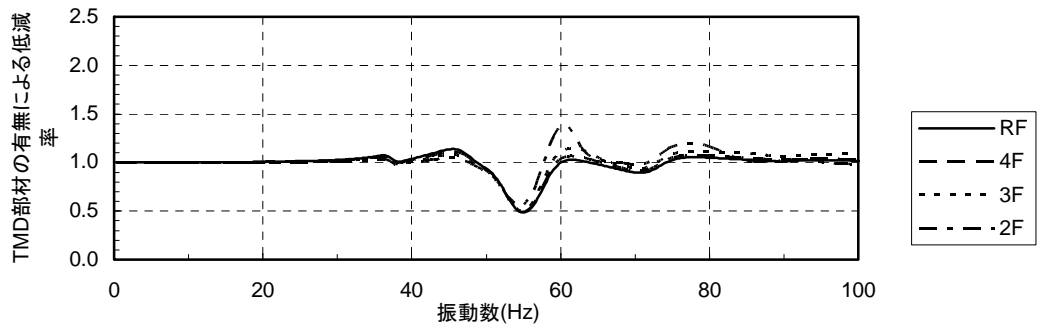


(e)有効質量比0.10

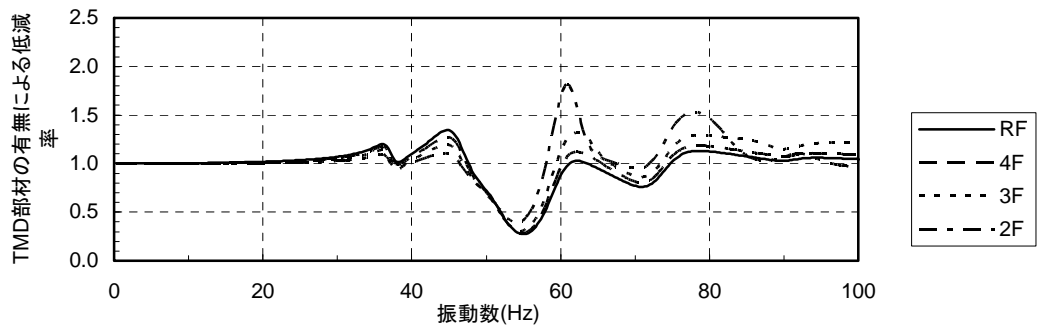
図 5.19 1階に対する各階のスラブ中央の伝達率(CASE II-2)



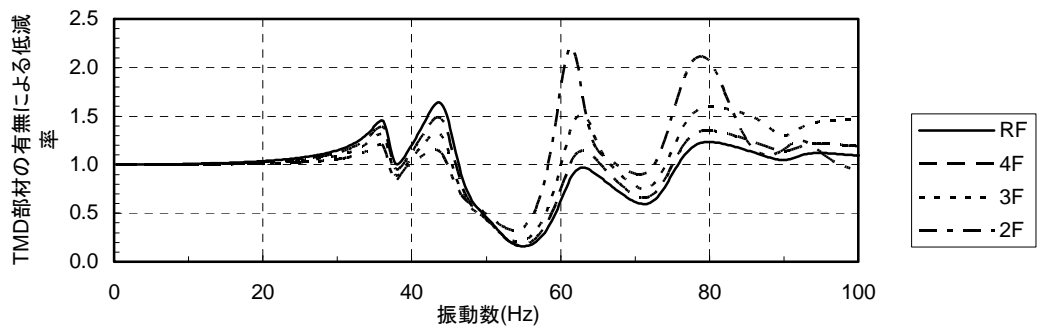
(a)有効質量比0.010



(b)有効質量比0.020

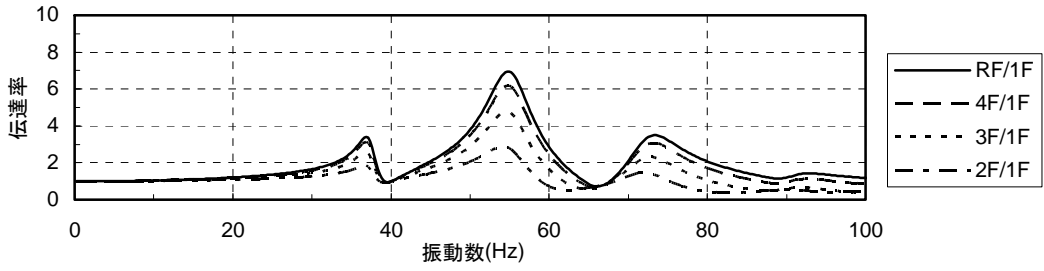


(c)有効質量比0.050

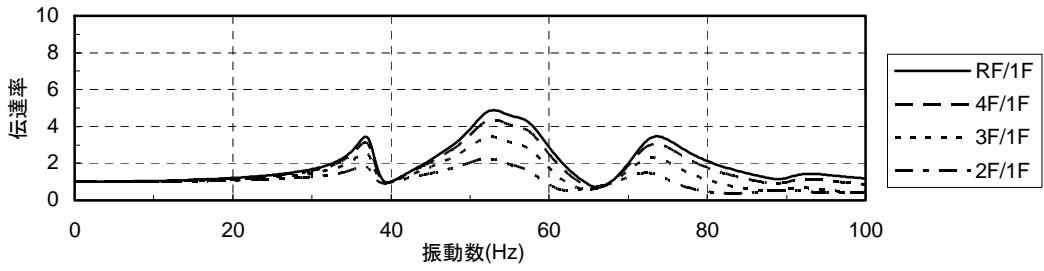


(d)有効質量比0.10

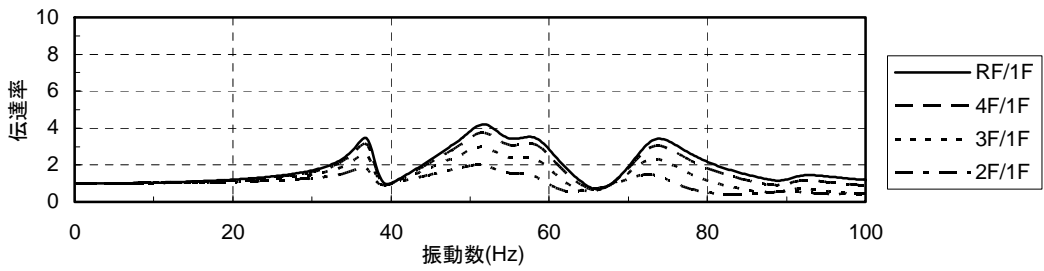
図 5.20 有効質量比の異なる TMD 部材の有無による低減率(CASE II-2)



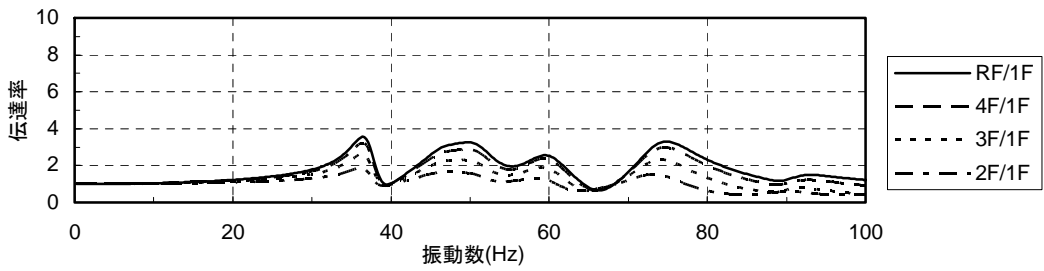
(a)TMD部材なし



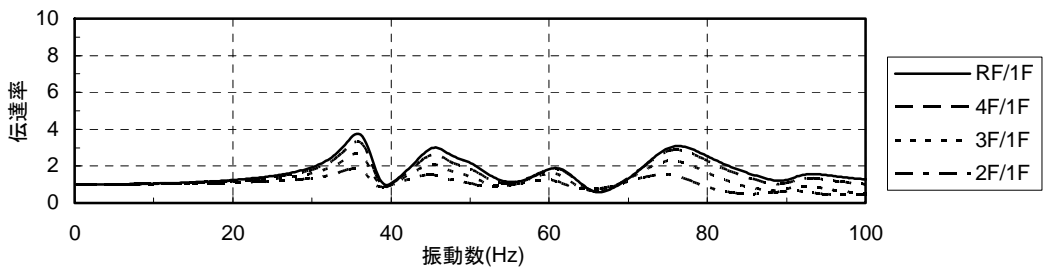
(b)有効質量比0.010



(c)有効質量比0.020

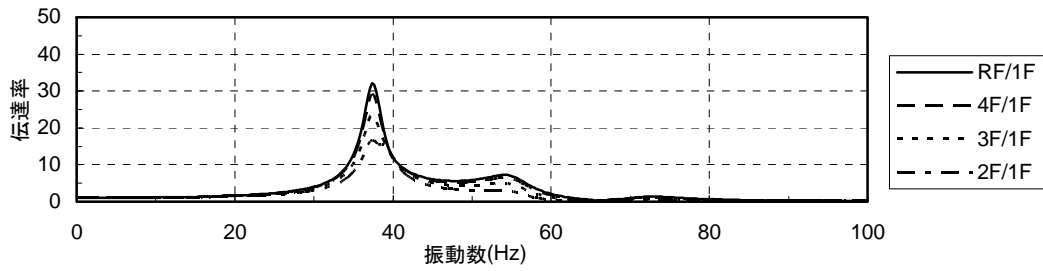


(d)有効質量比0.050

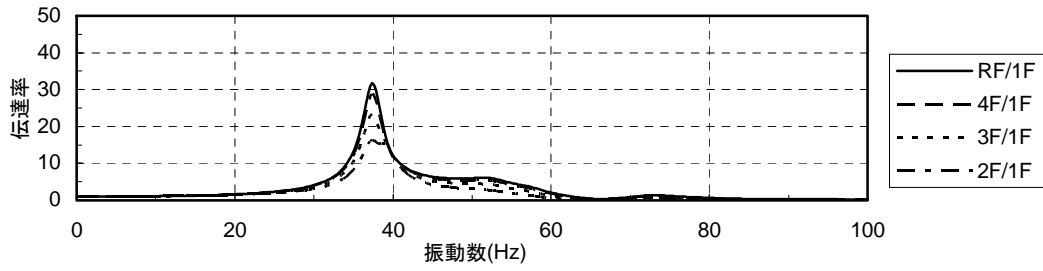


(e)有効質量比0.10

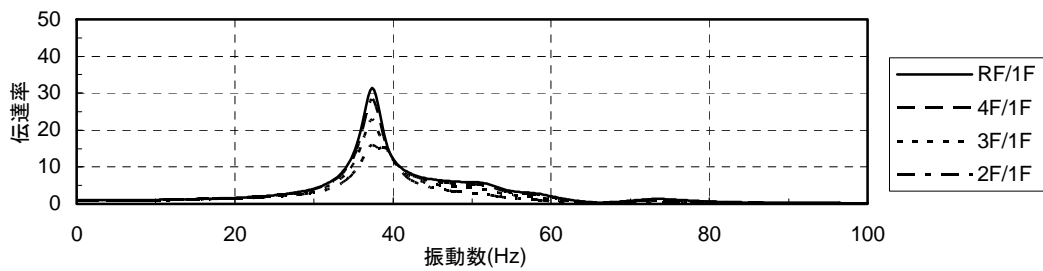
図 5.21 1階に対する各階の柱際の伝達率(CASE II-3)



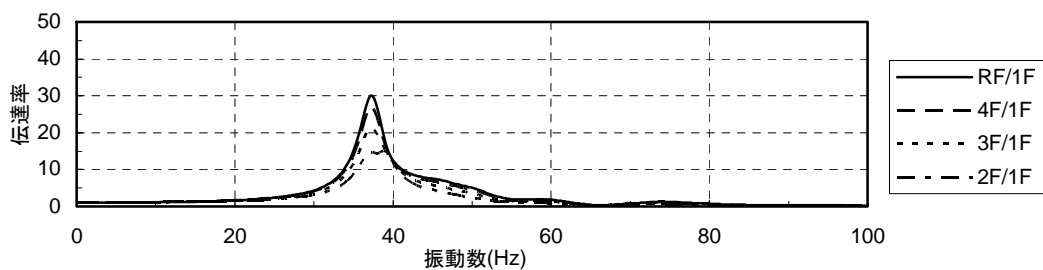
(a)TMD部材なし



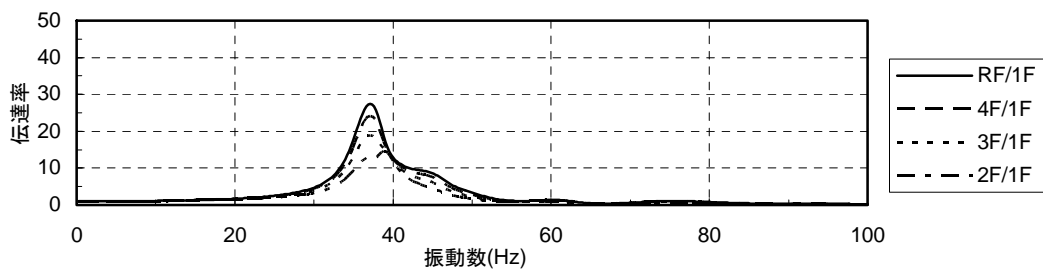
(b)有効質量比0.010



(c)有効質量比0.020

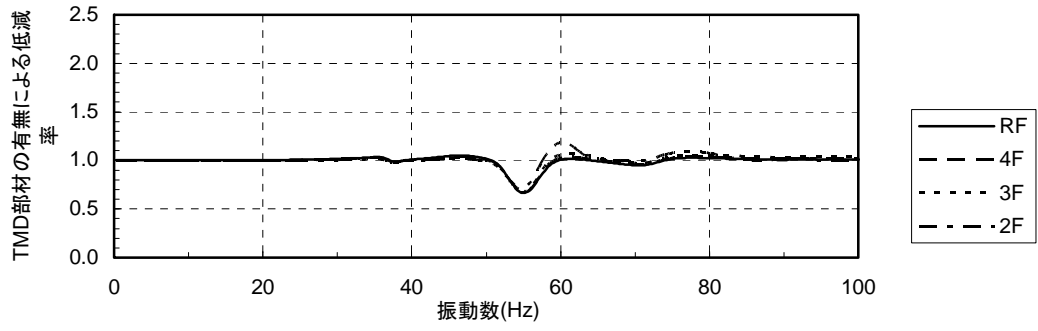


(d)有効質量比0.050

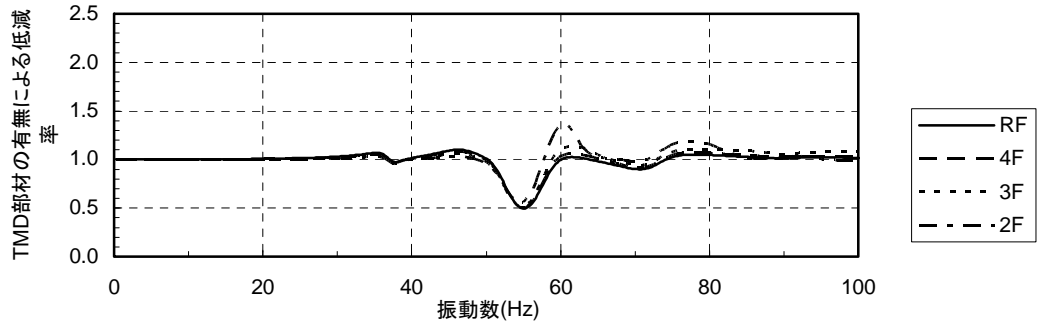


(e)有効質量比0.10

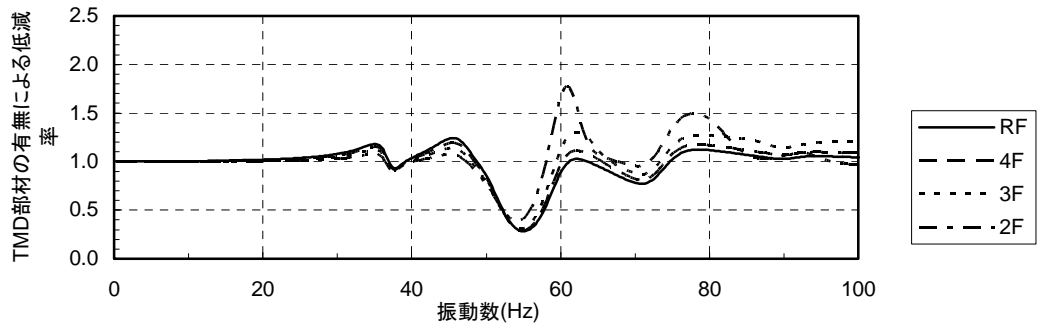
図 5.22 1階に対する各階のスラブ中央の伝達率(CASE II-3)



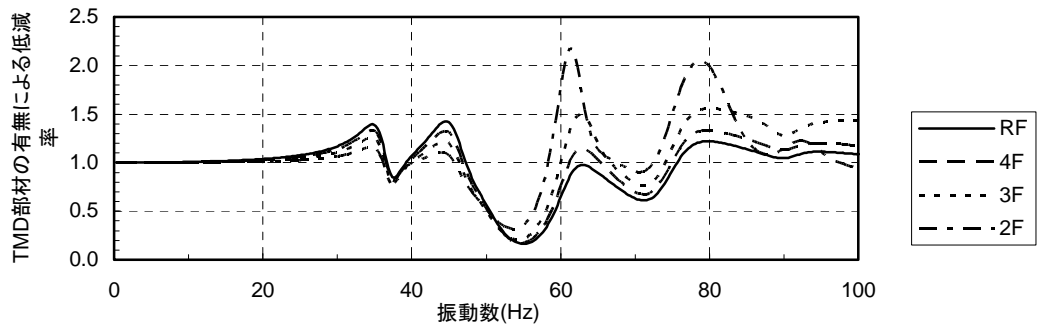
(a)有効質量比0.010



(b)有効質量比0.020



(c)有効質量比0.050



(d)有効質量比0.10

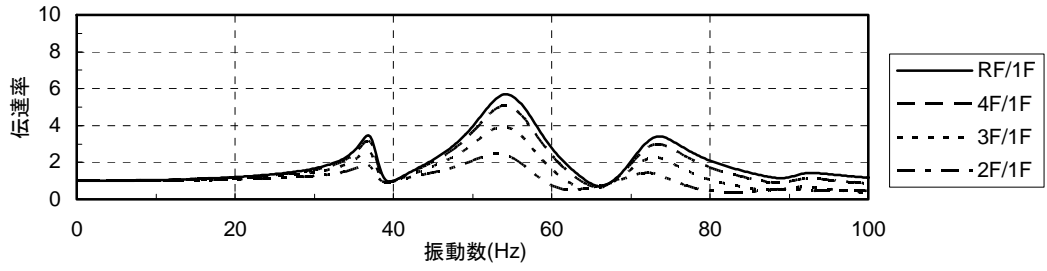
図 5.23 有効質量比の異なる TMD 部材の有無による低減率(CASE II-3)

### (3) TMD 部材の減衰の影響

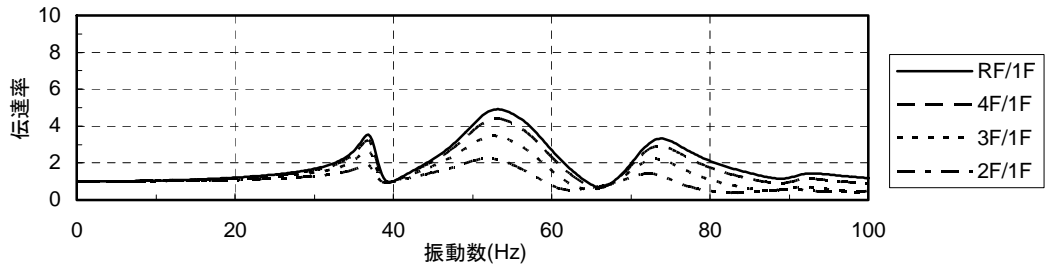
図 5.24, 図 5.27にCASE I-1 の減衰定数 $h_{TMD}=0.12$  と $h_{TMD}=0.20$  の 1 階に対する各階の壁際における伝達率, 図 5.25, 図 5.28に減衰定数 $h_{TMD}=0.12$  と $h_{TMD}=0.20$  の 1 階に対する各階のスラブ中央における伝達率, 図 5.26, 図 5.29に減衰定数 $h_{TMD}=0.12$  と $h_{TMD}=0.20$  の有効質量比の異なるTMD部材の有無による低減率をそれぞれ示す。

特に, 図 5.26, 図 5.29を見るとTMD部材の減衰定数が大きくなるにしたがい, 伝達率と振動低減効果の凹凸が小さくなっていく様子が分かる。すなわち, TMD部材に減衰を付加することにより, TMD部材の固有振動数以外の振動数領域において伝達率の増幅は低減されるが, TMD部材の固有振動数付近における振動低減効果も限定的となる。実際にTMD部材を設置する場合は想定される鉄道振動の振動特性に応じて適切な減衰定数を設定する必要がある。

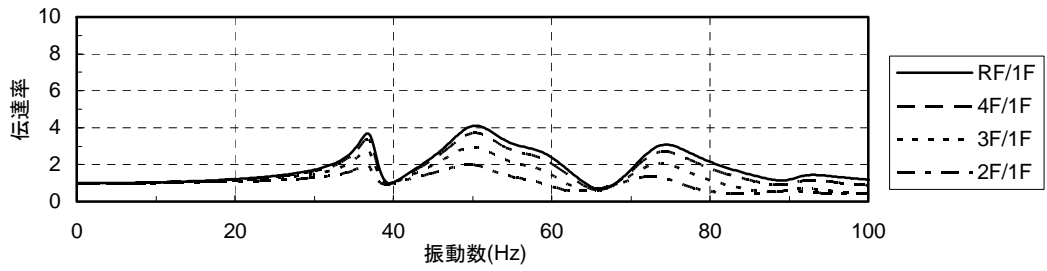




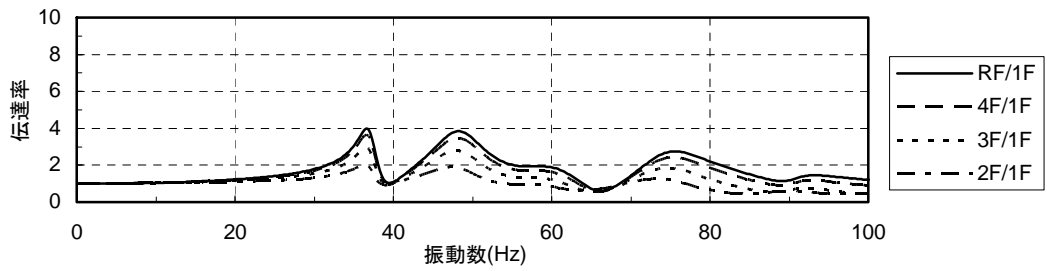
(a)有効質量比0.010



(b)有効質量比0.020

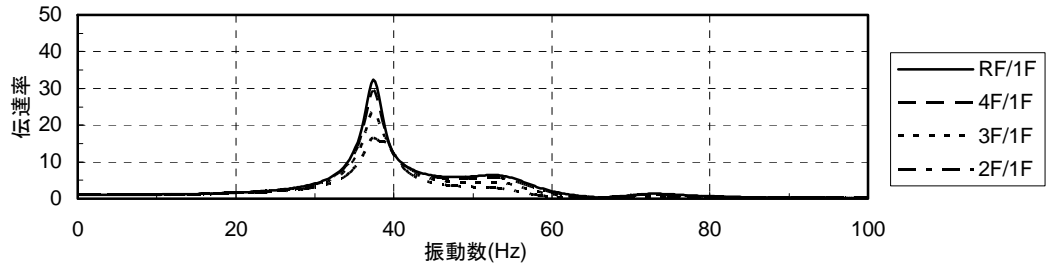


(c)有効質量比0.050

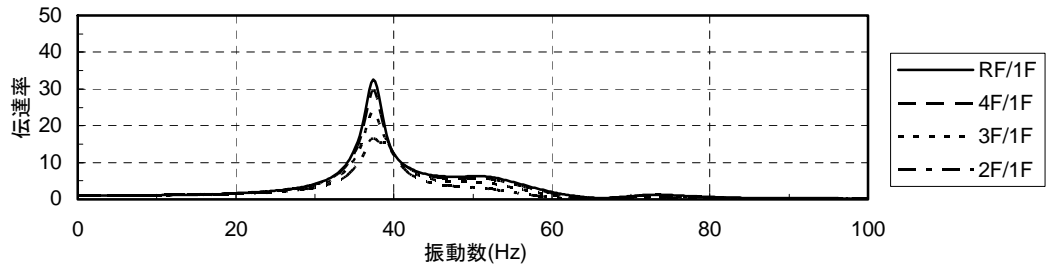


(d)有効質量比0.10

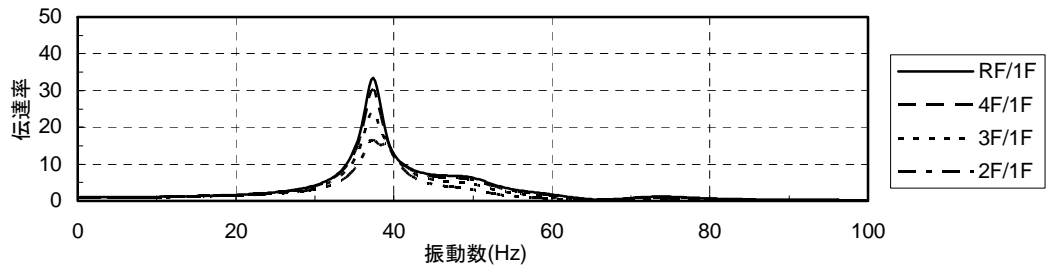
図 5.24 1階に対する各階の壁際の伝達率(CASE I-1;  $h_{TMD}=0.12$ )



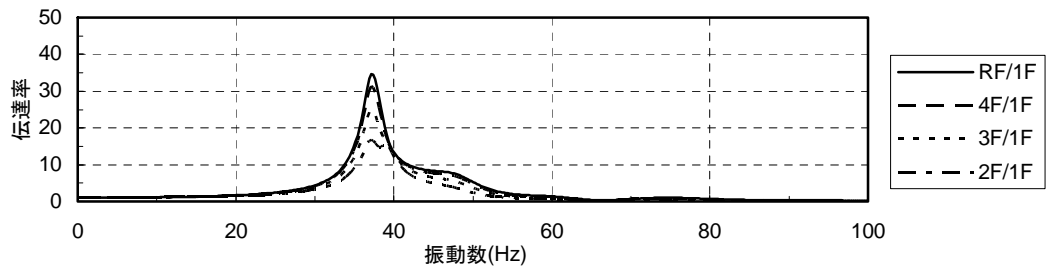
(a)有効質量比0.010



(b)有効質量比0.020

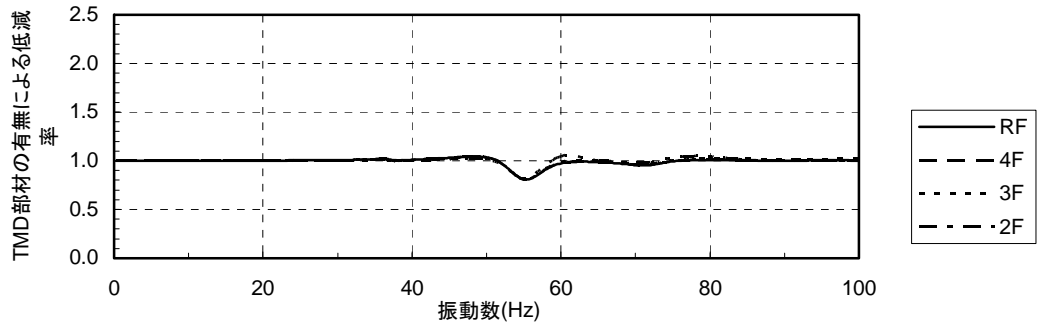


(c)有効質量比0.050

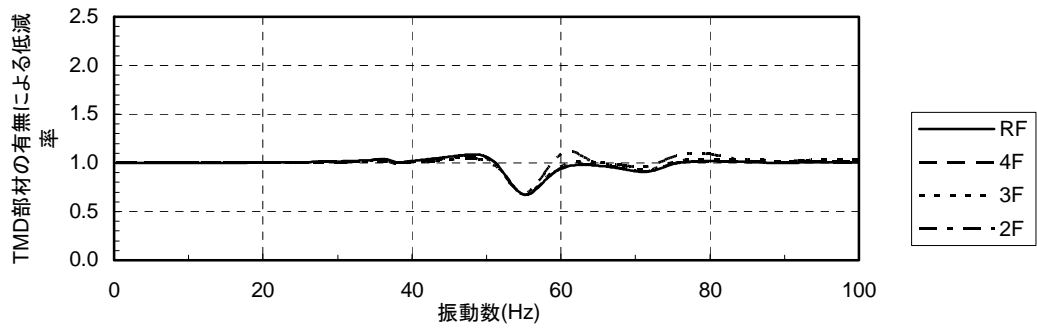


(d)有効質量比0.10

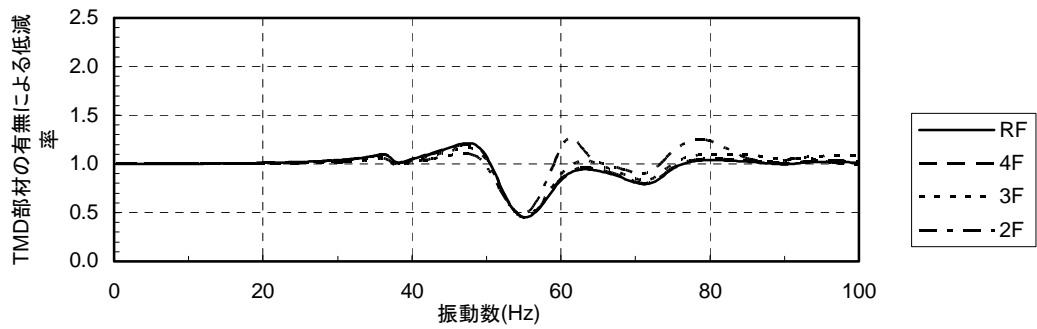
図 5.25 1階に対する各階のスラブ中央の伝達率(CASE I-1;  $h_{TMD}=0.12$ )



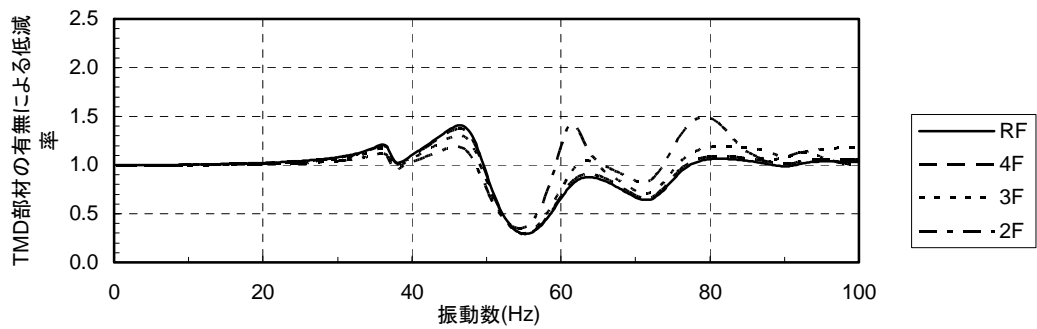
(a)有効質量比0.010



(b)有効質量比0.020

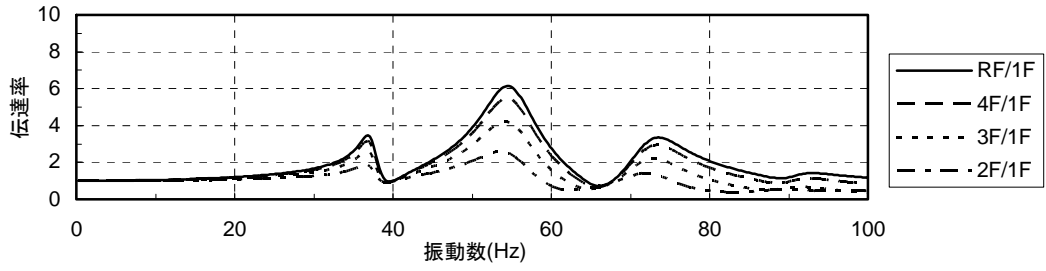


(c)有効質量比0.050

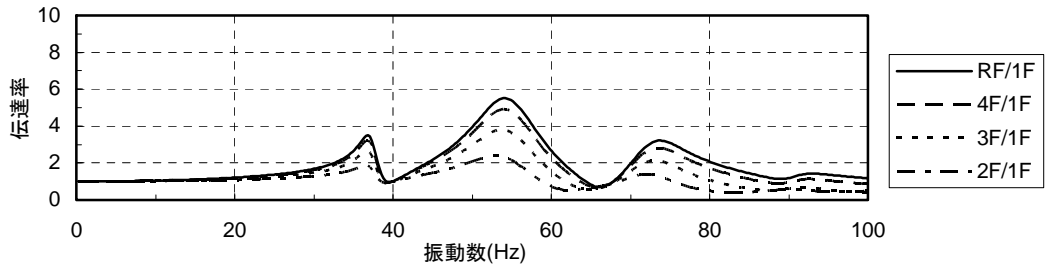


(d)有効質量比0.10

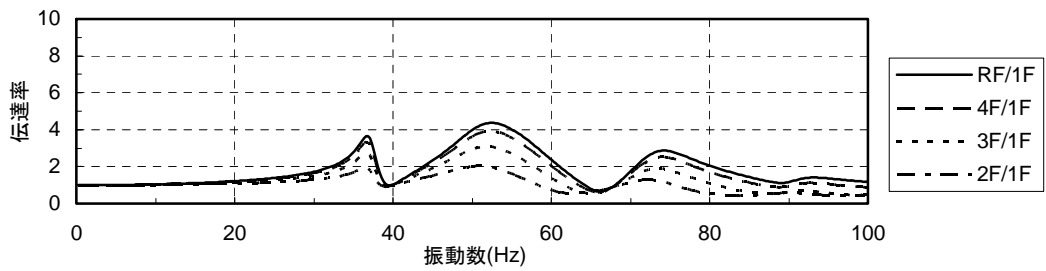
図 5.26 有効質量比の異なる TMD 部材の有無による低減率(CASE I-1;  $h_{TMD}=0.12$ )



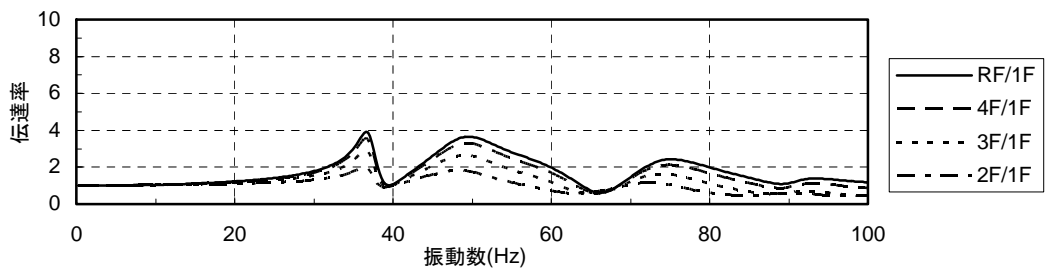
(a)有効質量比0.010



(b)有効質量比0.020

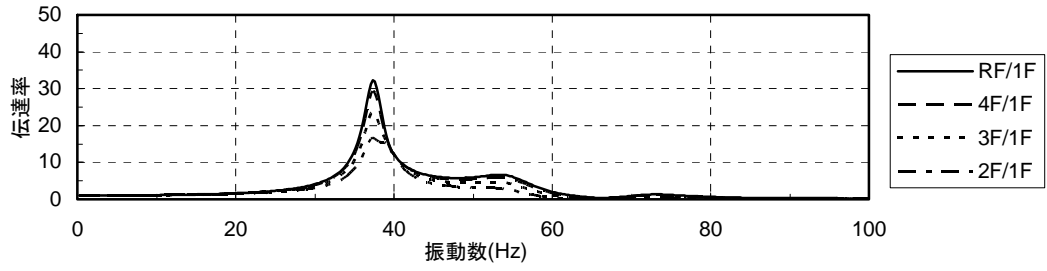


(c)有効質量比0.050

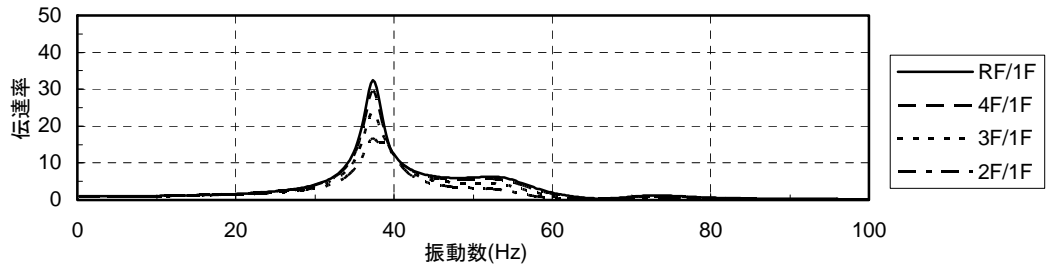


(d)有効質量比0.10

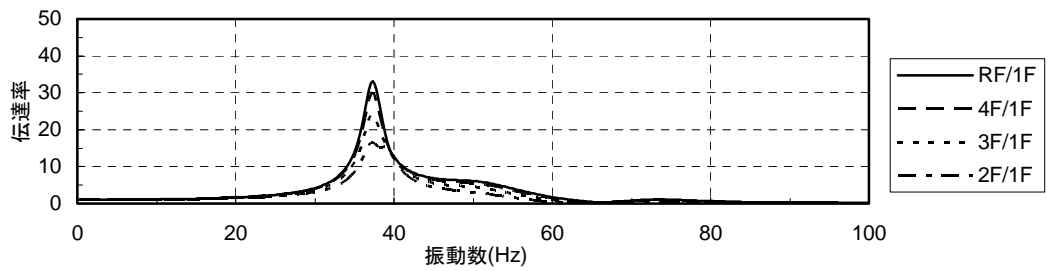
図 5.27 1階に対する各階の壁際の伝達率(CASE I-1;  $h_{TMD}=0.20$ )



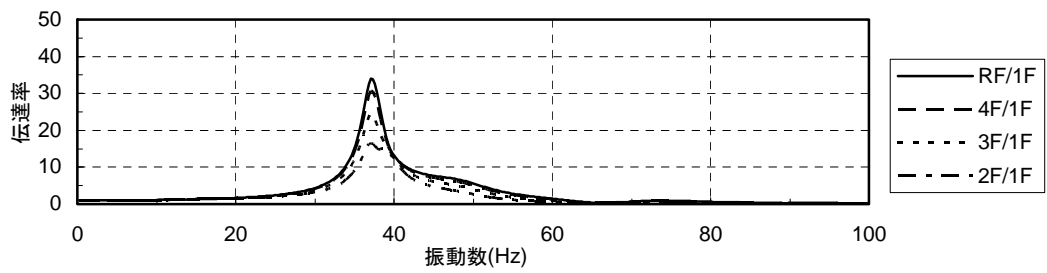
(a)有効質量比0.010



(b)有効質量比0.020

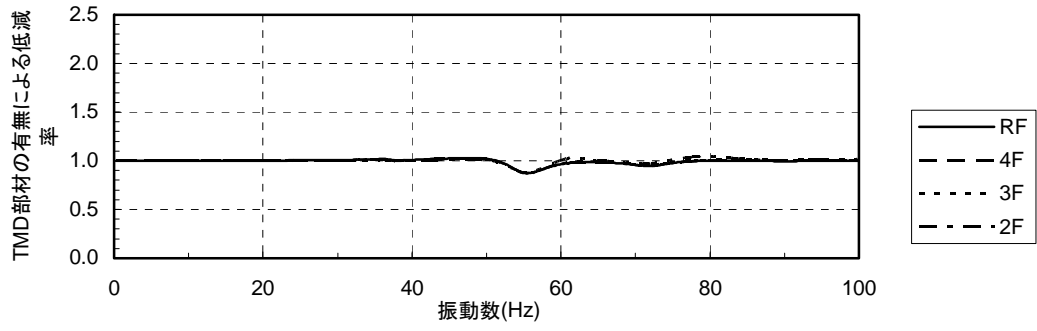


(c)有効質量比0.050

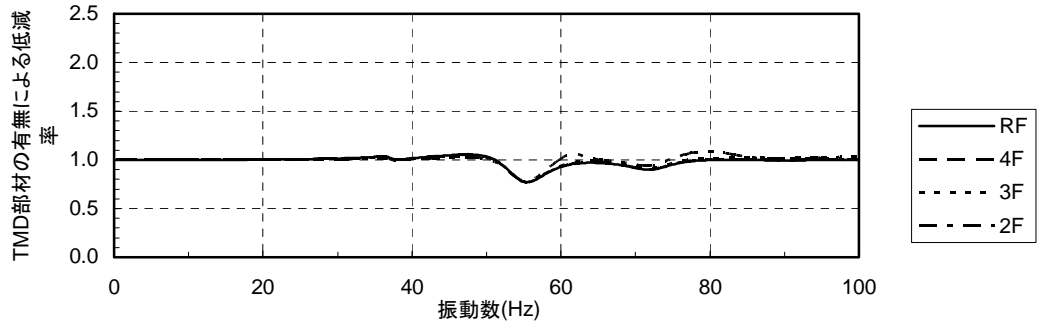


(d)有効質量比0.10

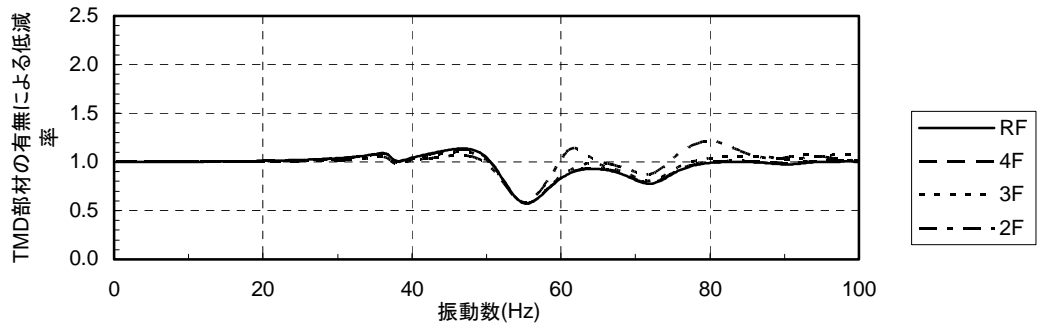
図 5.28 1階に対する各階のスラブ中央の伝達率(CASE I-1;  $h_{TMD}=0.20$ )



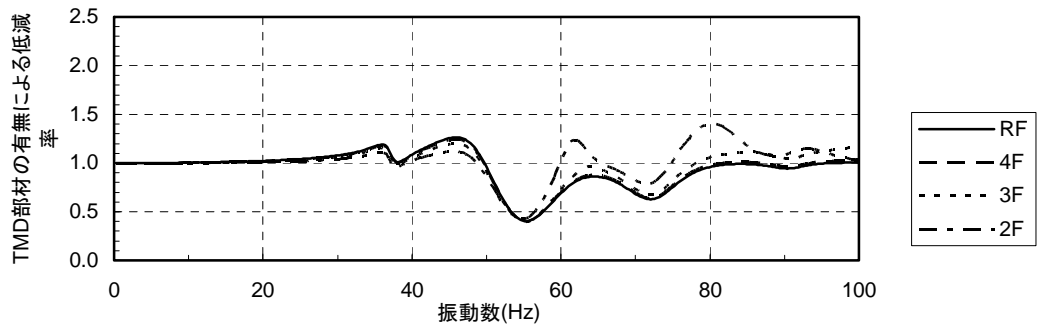
(a)有効質量比0.010



(b)有効質量比0.020



(c)有効質量比0.050



(d)有効質量比0.10

図 5.29 有効質量比の異なる TMD 部材の有無による低減率(CASE I-1;  $h_{TMD}=0.20$ )

## 5.3 TMD部材による高層建物の振動低減効果

### 5.3.1 解析対象建物の概要と解析パラメータ

#### (1) 解析対象建物の概要

図 5.30に解析対象の高層建物の概略図を示す。この高層建物は第 3 章で述べた 14 階建て建物と基本的に同一である。低層建物と同様にバルコニーおよび庇をTMD部材とする。ただし、前節の低層建物と同様に、本建物についてもバルコニーが小さく、さらにバルコニーが架構内に取り込まれた形式となっているため、このままではTMD部材としての効果をあまり期待できない。そこで、一般的な集合住宅によく見られる、はね出しのバルコニーが設置されているものと想定する。図 5.30(b)下段にバルコニーおよび庇の位置を斜線で示す。バルコニーと庇を付加した以外は既存の建物と同一である。

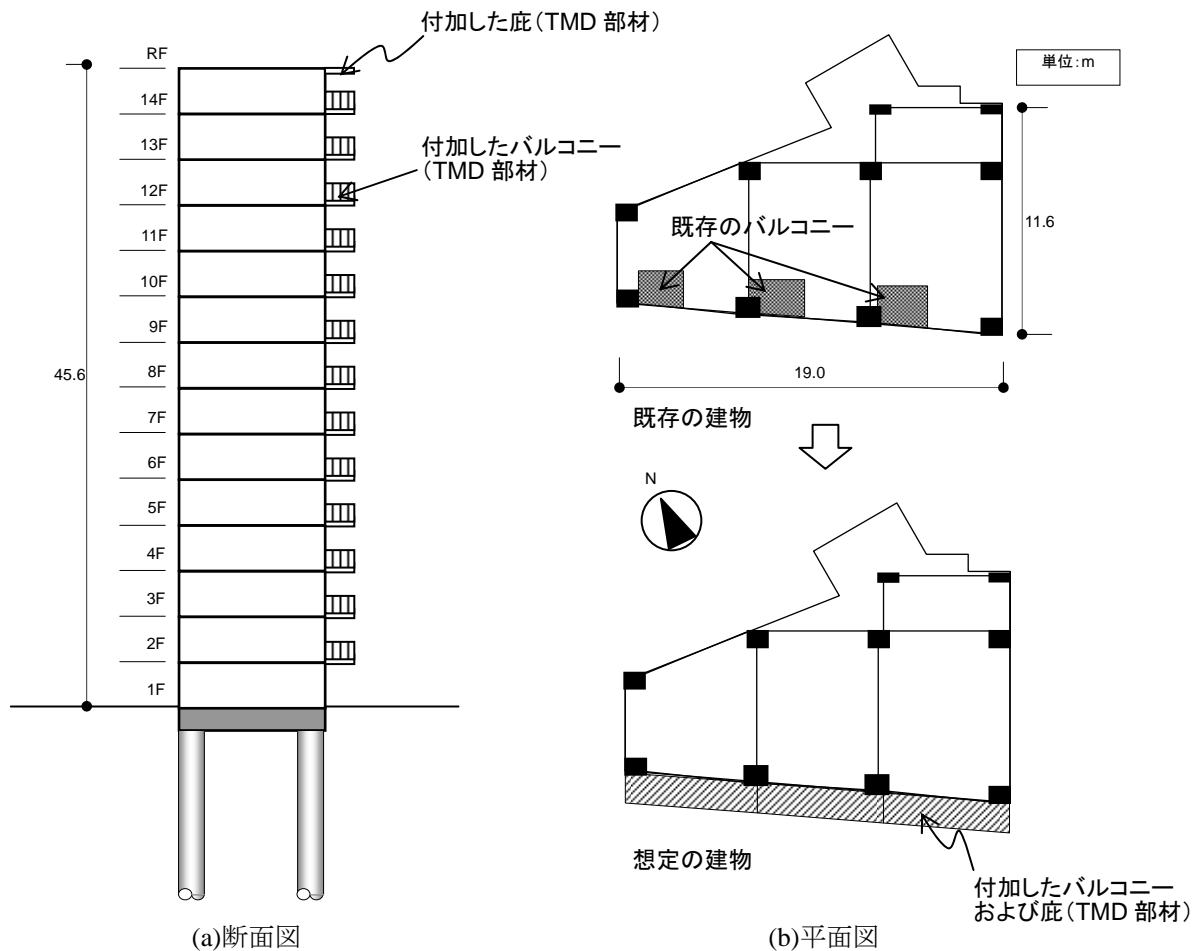


図 5.30 解析対象の高層建物の概略図

(2) 解析パラメータ

表 5.3および表 5.4に解析ケースおよび解析パラメータを示す。TMD部材を各階に配置する場合をCASE III, TMD部材を建物の頂部に集中して設置する場合をCASE IVとする。

CASE III では、TMD 部材の固有振動数を 50Hz としたものを CASE III-1, 60Hz としたものを CASE III-2 とする。高層建物の上下方向の 1 次固有振動数は低層建物のそれと比較して低いため、低層建物のように 1 次固有振動数と固体音領域が重複しない。そこで、低減させたい振動数を適宜設定することができる。ここでは、低減させたい振動数を 50Hz 付近と 60Hz 付近と想定して、TMD 部材を設計する。

CASE III-1 および CASE III-2 とともにパラメータは TMD 部材の各階質量に対する有効質量比であり、0.010, 0.020, 0.050, 0.10 とする。

CASE IV では、TMD 部材の固有振動数を 50Hz としたものの 1 ケースとする (CASE IV-1)。1 階壁の質量の半分と 2 階以上の質量の和に対する TMD 部材の有効質量の比をパラメータとし、CASE III と同様に同比を 0.010, 0.020, 0.050, 0.10 とする。

図 5.3および図 5.4に解析モデルの模式図を示す。TMD部材を設置していない解析モデルは第 3 章の解析モデルと同一である。

なお、TMD 部材の減衰定数を一律に  $h_{TMD}=0.07$  とした。

表 5.3 TMD 部材の設定パラメータ(CASE III)

| CASE 名     | 各階 TMD 部材数 | TMD 部材<br>振動数(Hz) | TMD 部材の有効質量比 |       |       |      | TMD 部材の<br>減衰定数 |
|------------|------------|-------------------|--------------|-------|-------|------|-----------------|
|            |            |                   | (a)          | (b)   | (c)   | (d)  |                 |
| CASE III-1 | 1          | 50                | 0.010        | 0.020 | 0.050 | 0.10 | 0.07            |
| CASE III-2 | 1          | 60                | 0.010        | 0.020 | 0.050 | 0.10 | 0.07            |

表 5.4 TMD 部材の設定パラメータ(CASE IV)

| CASE 名    | 頂部 TMD 部材数 | TMD 部材<br>振動数(Hz) | TMD 部材の有効質量比 |       |       |      | TMD 部材の<br>減衰定数 |
|-----------|------------|-------------------|--------------|-------|-------|------|-----------------|
|           |            |                   | (a)          | (b)   | (c)   | (d)  |                 |
| CASE IV-1 | 1          | 50                | 0.010        | 0.020 | 0.050 | 0.10 | 0.07            |



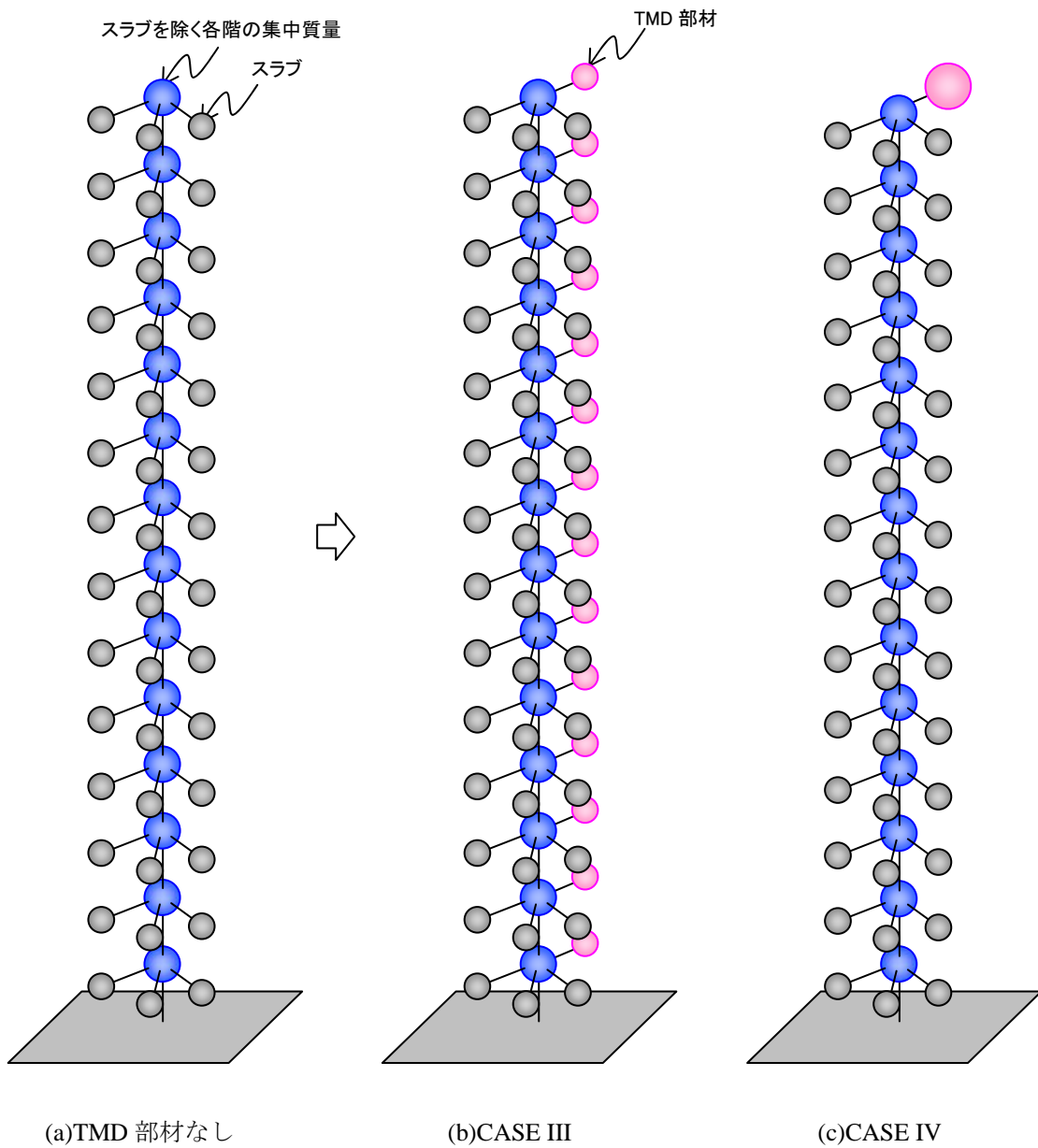


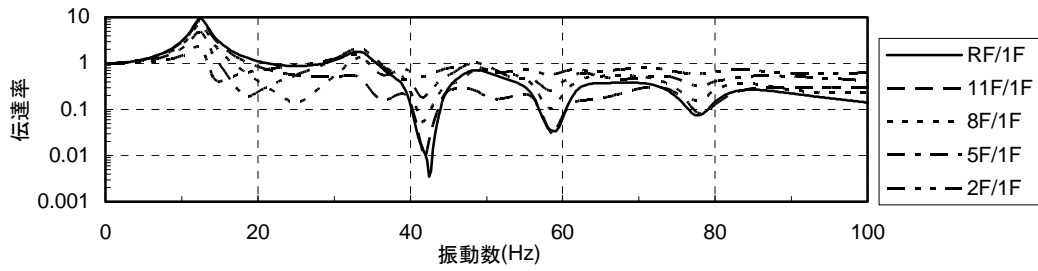
図 5.31 高層建物に TMD 部材を設置した場合の解析モデル

### 5.3.2 高層建物の解析結果

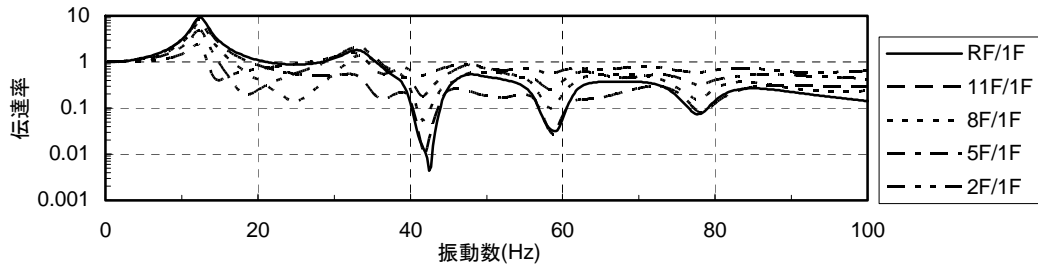
#### (1) CASE III

図 5.32, 図 5.35にCASE III-1 およびCASE III-2 の 1 階に対する各階の柱際における伝達率をそれぞれ示す。図が煩雑となるので、代表階として 2 階, 5 階, 8 階, 11 階, 屋上階の結果についてそれぞれ示す。本項に示す以下の図も同様である。約 12Hzに上下方向の 1 次振動モードの卓越振動数が見られる。他の振動数領域では高次の振動モードやスラブの振動にともなう伝達率の凹凸が見られるものの、高振動数になるにしたがい伝達率が低下している。また、前節の低層建物と

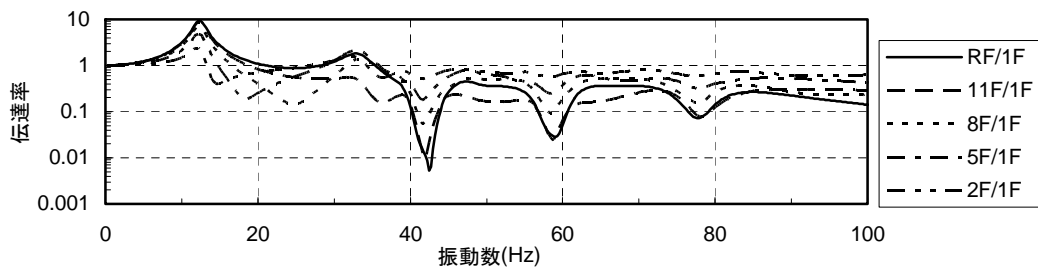
同様に有効質量比の増大にともない、CASE III-1 では 50Hz付近が、CASE III-2 では 60Hz付近の伝達率が低下している。図 5.33, 図 5.36にCASE III-1 およびCASE III-2 の 1 階に対する各階のスラブ中央における伝達率をそれぞれ示す。これらの図も、CASE III-1 では 50Hz付近が、CASE III-2 では 60Hz付近の伝達率が低下しており、その傾向は柱際と同様である。図 5.34, 図 5.37にこれらの解析ケースにおける有効質量比の異なるTMD部材の有無による低減率をそれぞれ示す。低減率に凹凸が見られるものの、やはり 50Hz付近と 60Hz付近の振動低減効果が大きいことが分かる。また、これらの振動数付近では高い階になるにしたがい振動低減効果が大きくなり、低い階における同効果は顕著でないことが分かる。



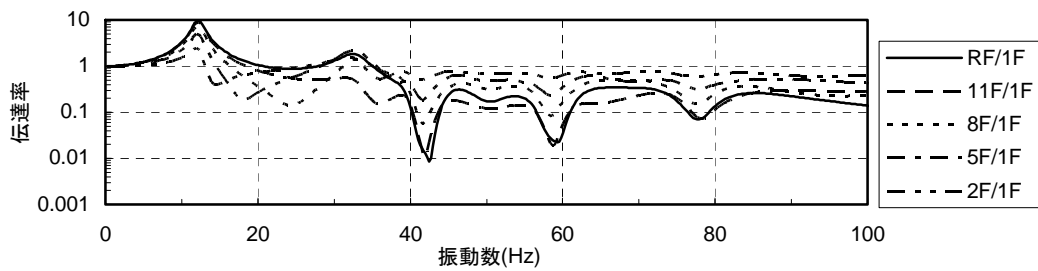
(a)TMD部材なし



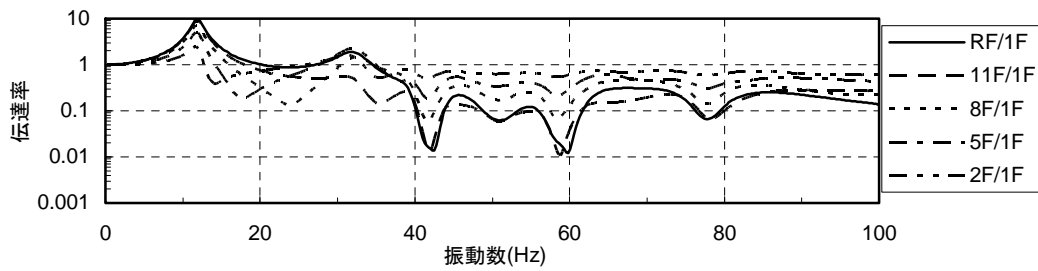
(b)有効質量比0.010



(c)有効質量比0.020

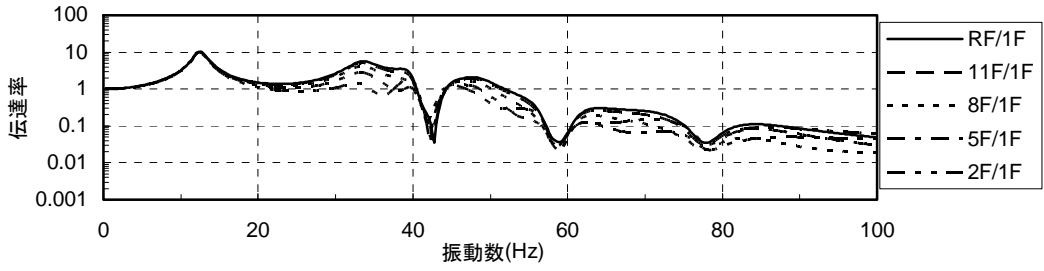


(d)有効質量比0.050

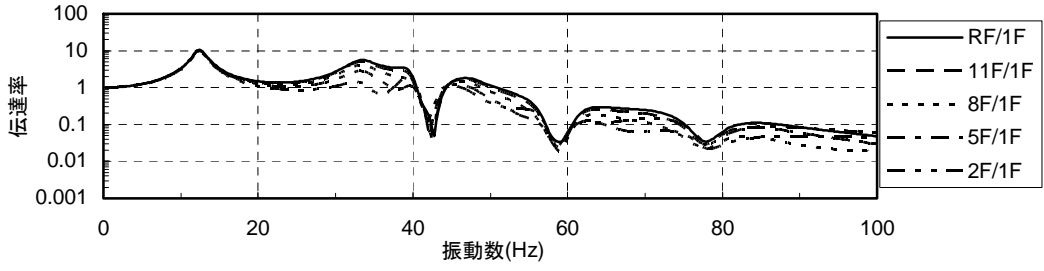


(e)有効質量比0.10

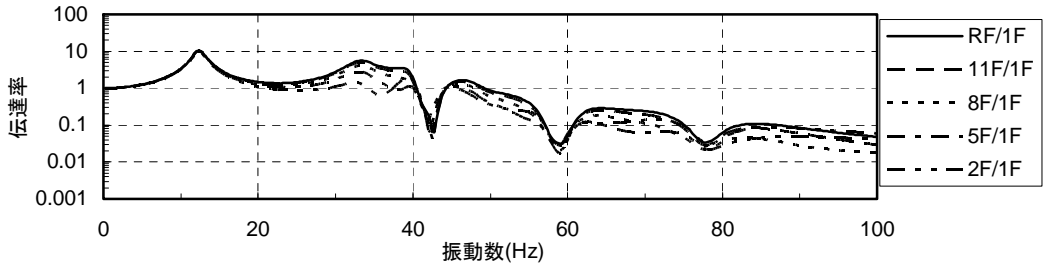
図 5.32 1階に対する各階の柱際の伝達率(CASE III-1)



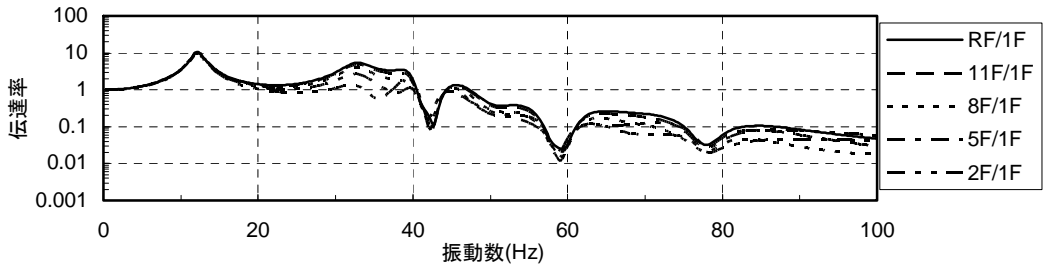
(a)TMD部材なし



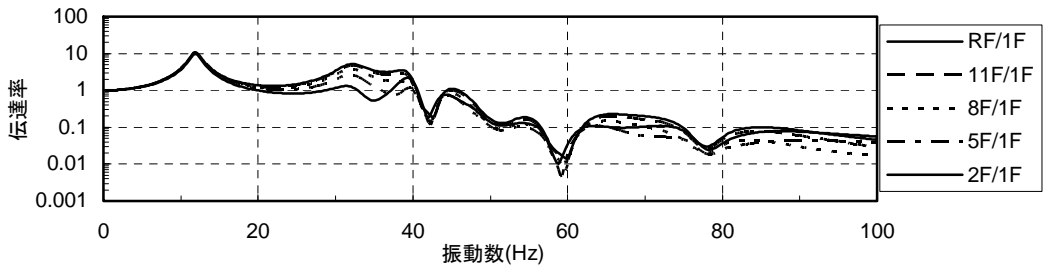
(b)有効質量比0.010



(c)有効質量比0.020

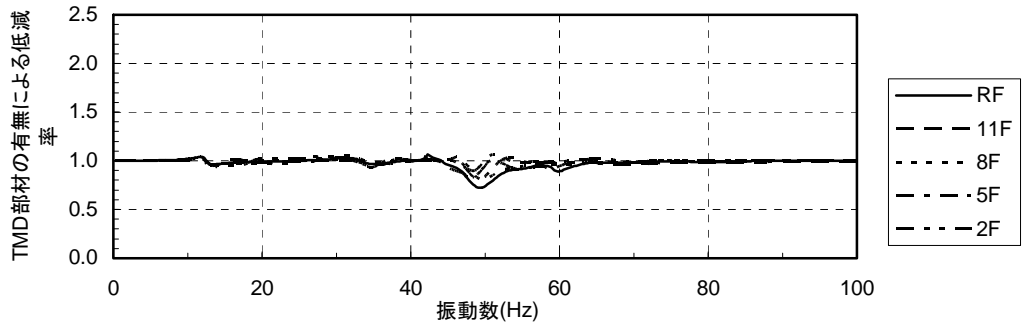


(d)有効質量比0.050

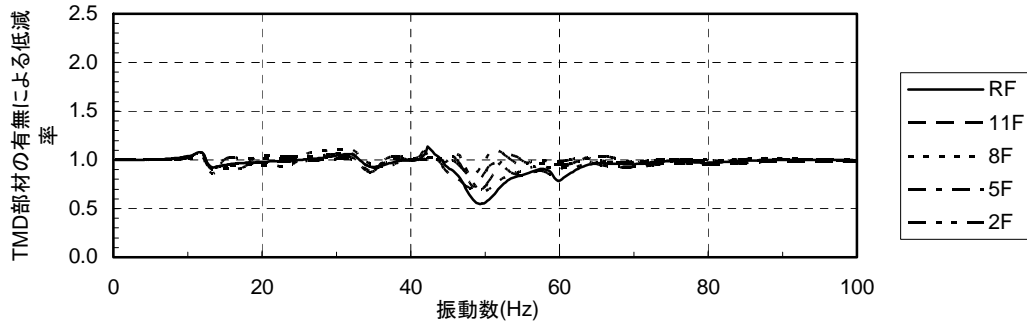


(e)有効質量比0.10

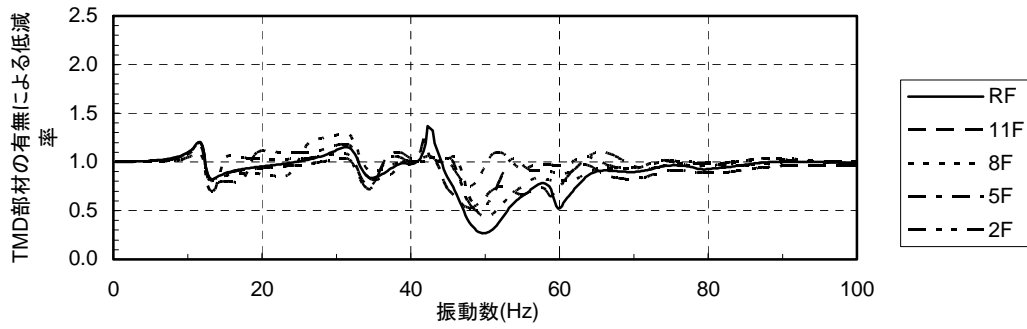
図 5.33 1階に対する各階のスラブ中央の伝達率(CASE III-1)



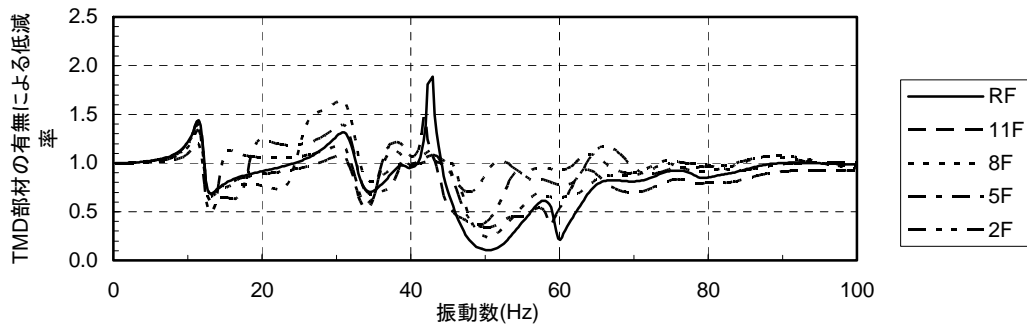
(a)有効質量比0.010



(b)有効質量比0.020

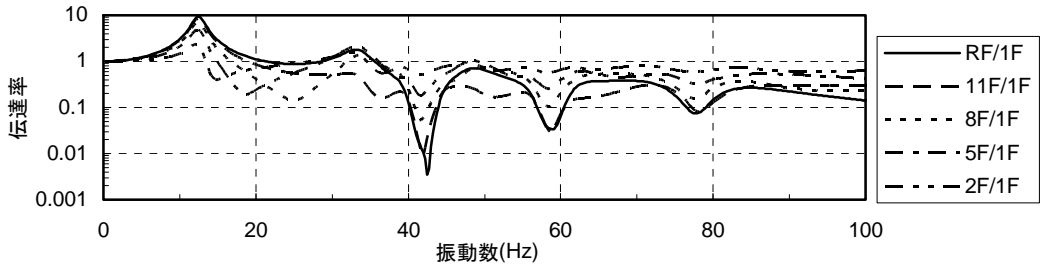


(c)有効質量比0.050

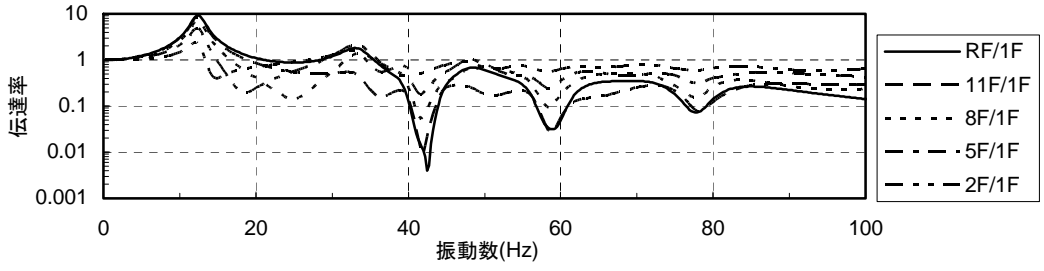


(d)有効質量比0.10

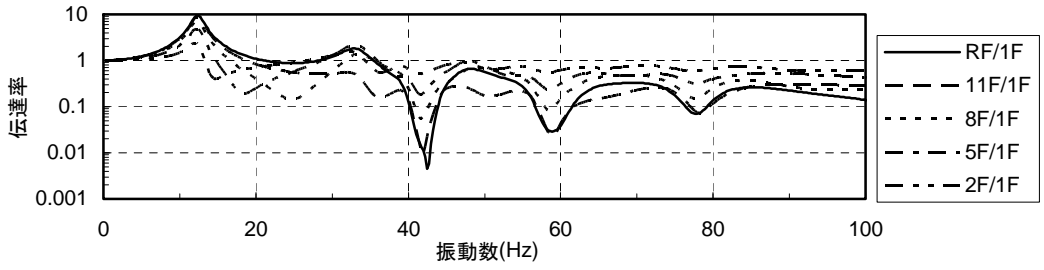
図 5.34 有効質量比の異なる TMD 部材の有無による低減率(CASE III-1)



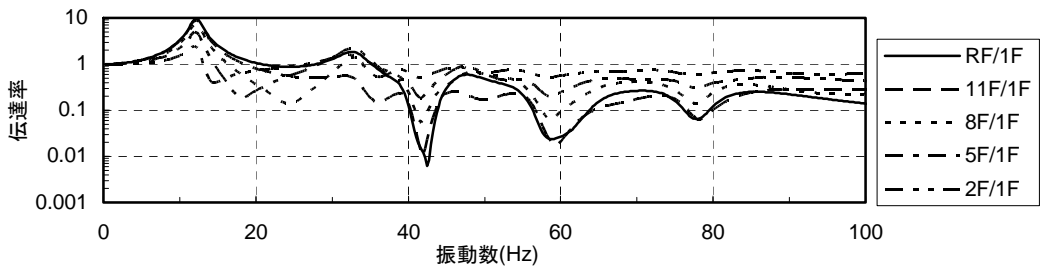
(a)TMD部材なし



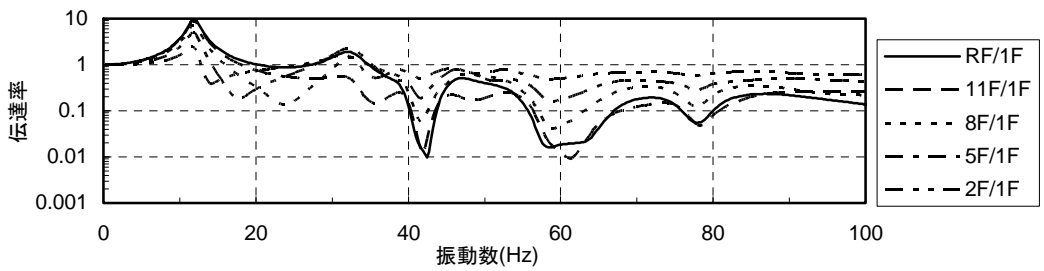
(b)有効質量比0.010



(c)有効質量比0.020

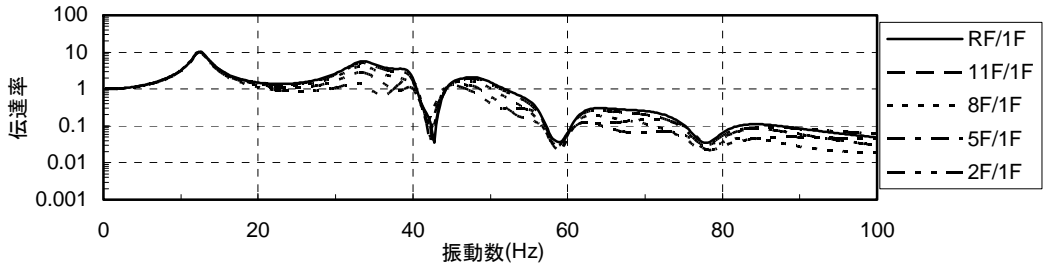


(d)有効質量比0.050

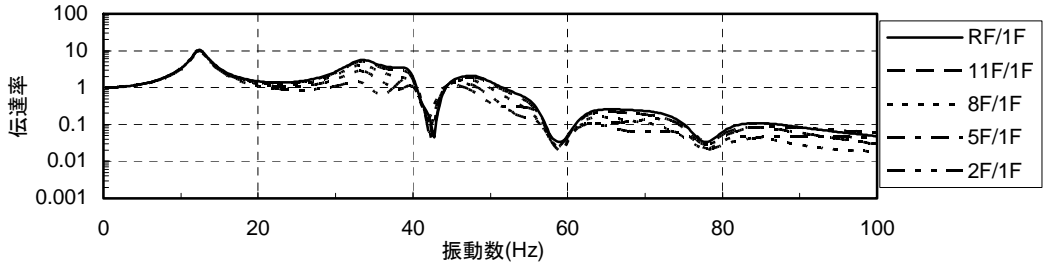


(e)有効質量比0.10

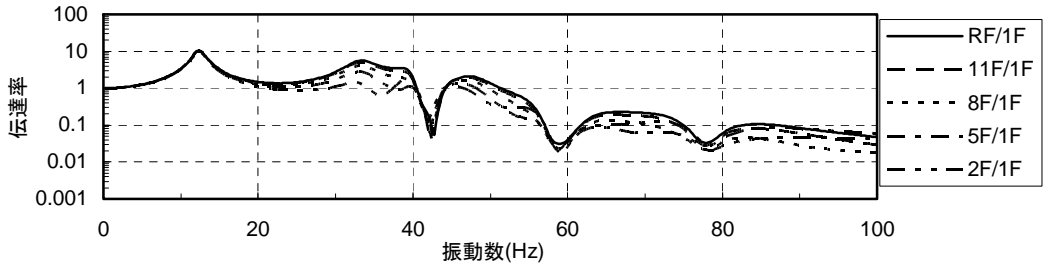
図 5.35 1階に対する各階の柱際の伝達率(CASE III-2)



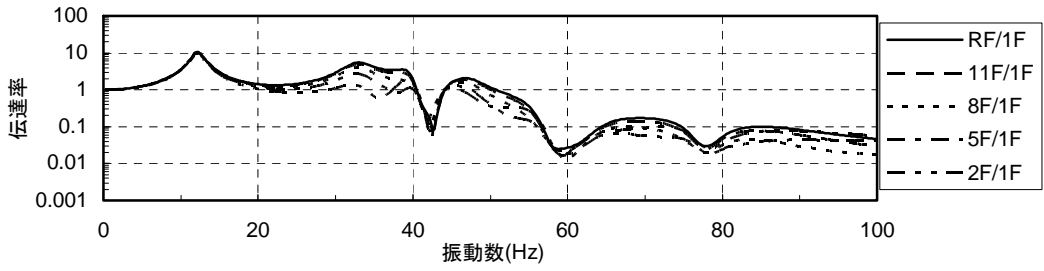
(a)TMD部材なし



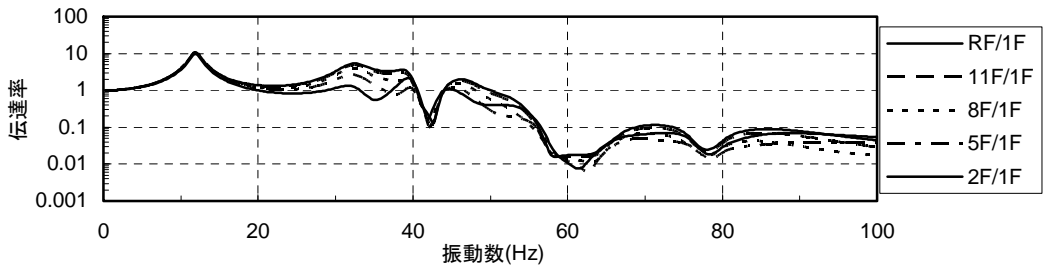
(b)有効質量比0.010



(c)有効質量比0.020

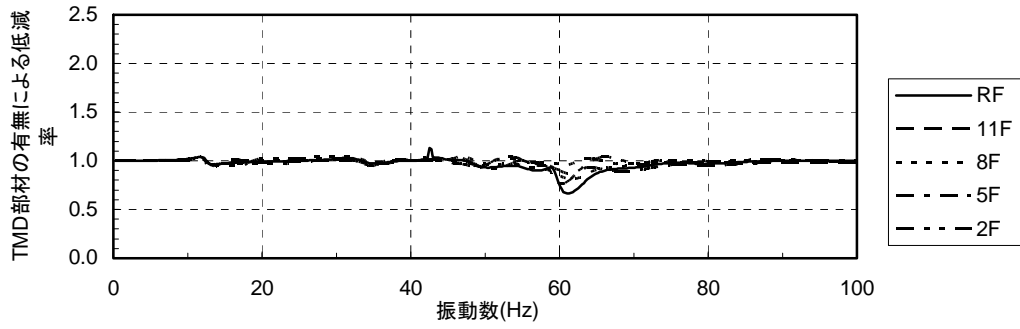


(d)有効質量比0.050

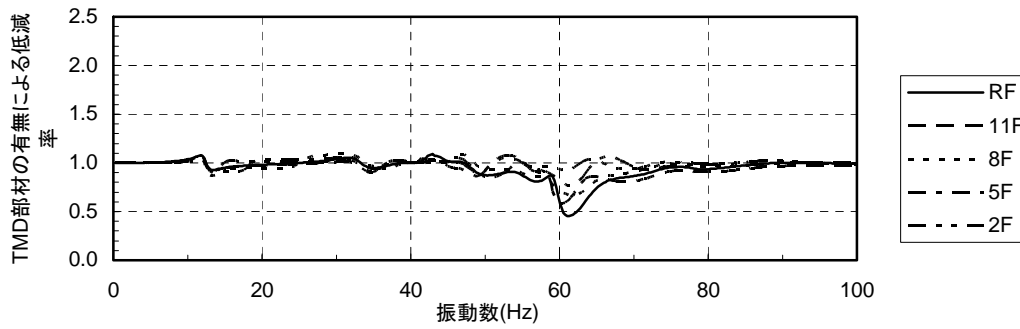


(e)有効質量比0.10

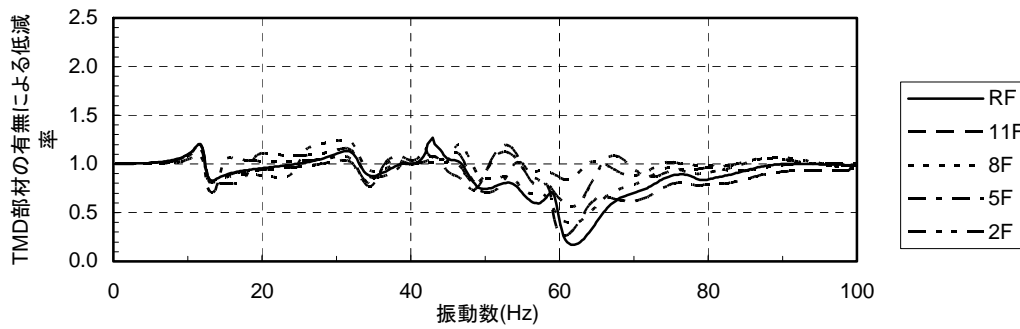
図 5.36 1階に対する各階のスラブ中央の伝達率(CASE III-2)



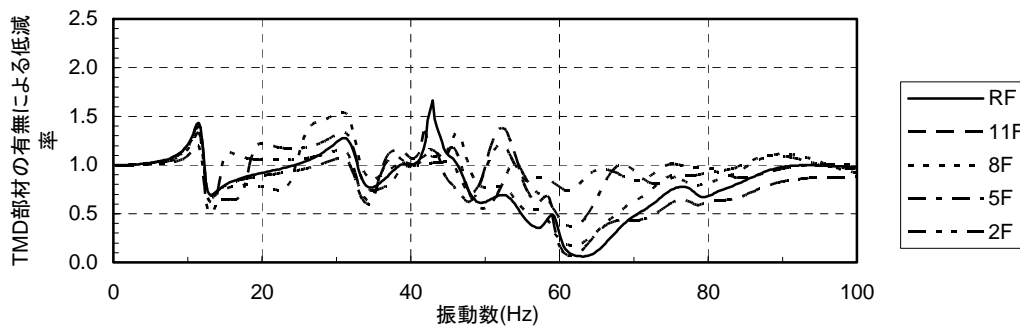
(a)有効質量比0.010



(b)有効質量比0.020



(c)有効質量比0.050



(d)有効質量比0.10

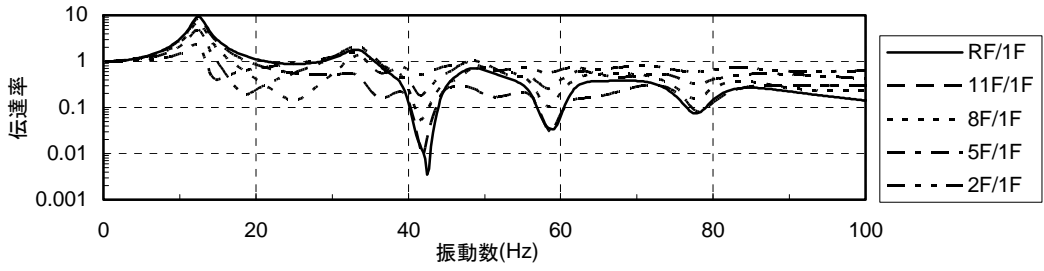
図 5.37 有効質量比の異なる TMD 部材の有無による低減率(CASE III-2)



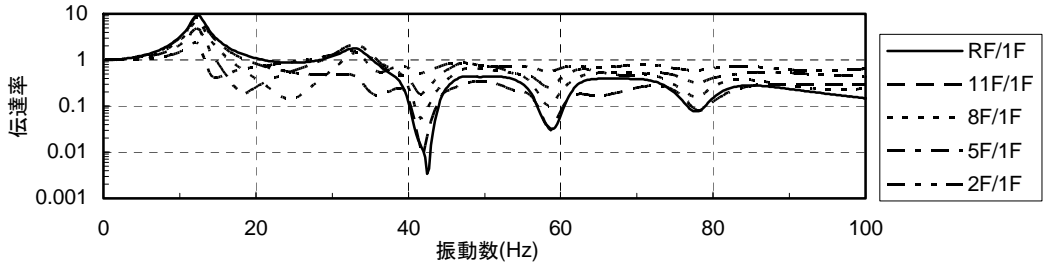
## (2) CASE IV

図 5.38にCASE IV-1 の 1 階に対する各階の柱際における伝達率を、図 5.39に 1 階に対する各階のスラブ中央における伝達率をそれぞれ示す。TMD部材の固有振動数は 50Hzであるが、CASE III と異なり 50Hz付近における伝達率の低減はあまり見られない。図 5.40に有効質量比の異なる TMD部材の有無による伝達率を示す。屋上階では固体音領域において振動低減効果が見られるが、その他の階では逆に増幅していることが分かる。特に、有効質量比 0.10 における 11 階では約 3.5 倍に増幅している。

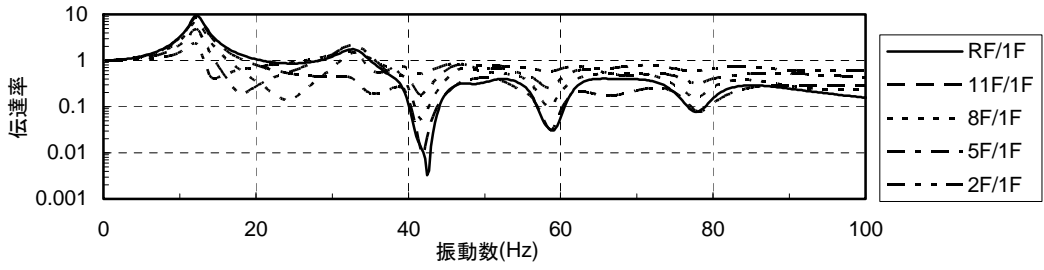
以上より、固体音の低減を目的として TMD 部材を設置する場合に、建物の頂部にのみ TMD 部材を設置する場合には顕著な振動低減効果が得られないことが分かった。建物の頂部に設置して振動低減効果が得られるのは、低層建物のように上下方向の 1 次固有振動数と固体音に関連する振動数が概ね一致する場合であり、高層建物のように上下方向の 1 次固有振動数が 10Hz 前後となる場合には、振動低減効果はほとんど得られない。



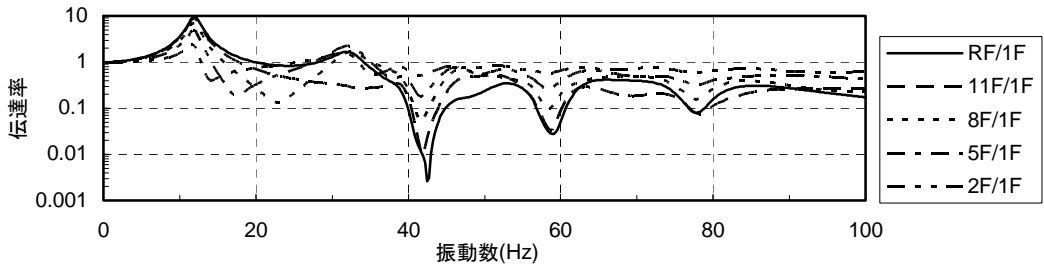
(a)TMD部材なし



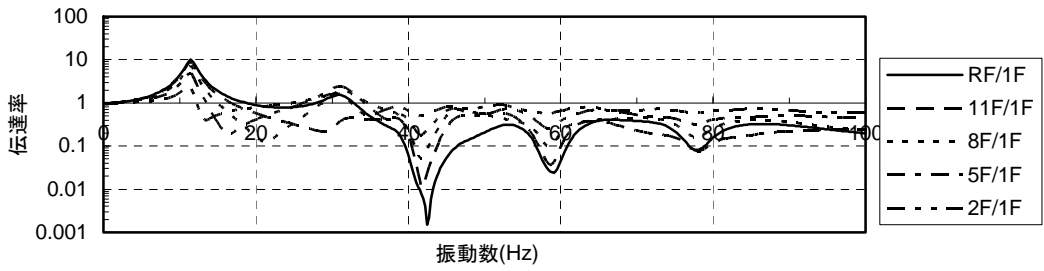
(b)有効質量比0.010



(c)有効質量比0.020

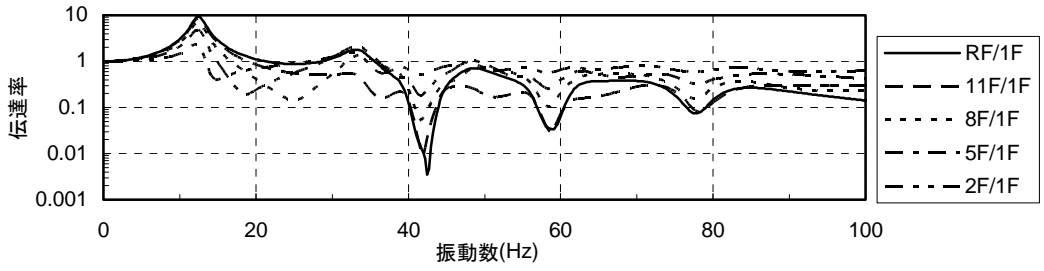


(d)有効質量比0.050

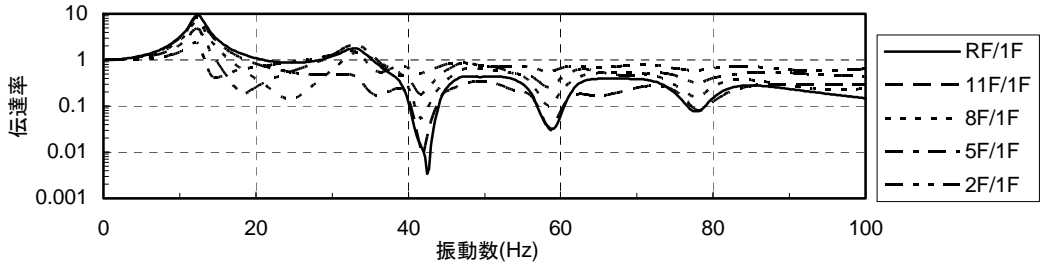


(e)有効質量比0.10

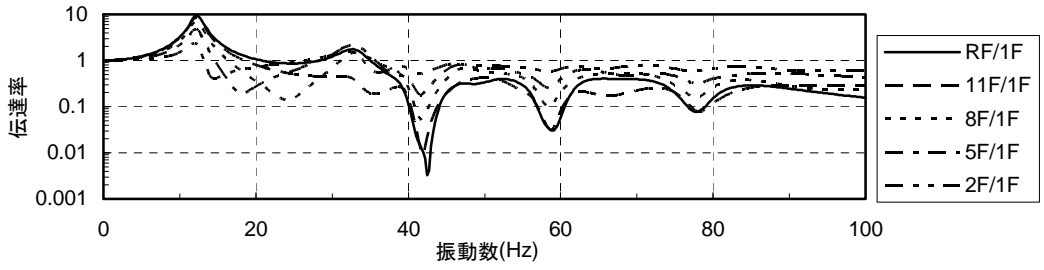
図 5.38 1階に対する各階の柱際の伝達率(CASE IV-1)



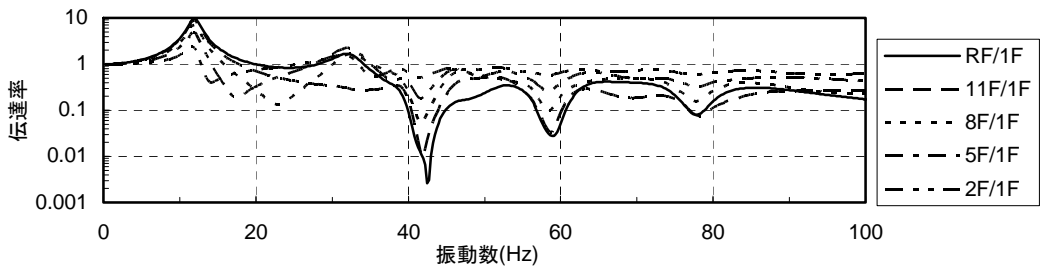
(a)TMD部材なし



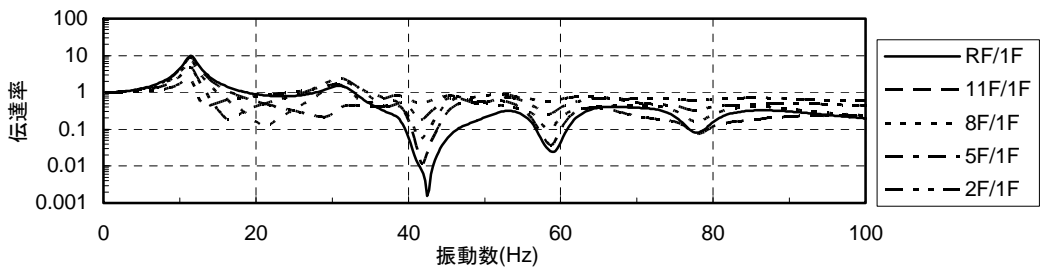
(b)有効質量比0.010



(c)有効質量比0.020

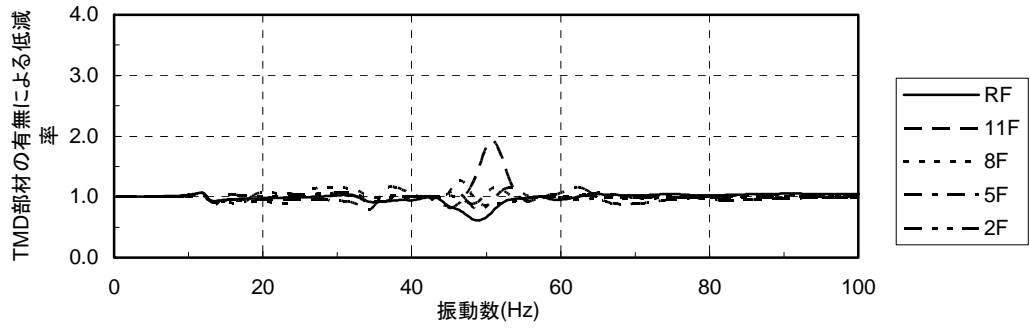


(d)有効質量比0.050

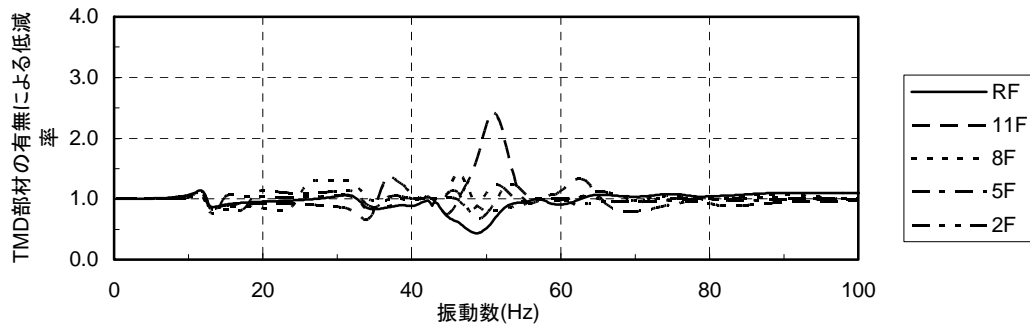


(e)有効質量比0.10

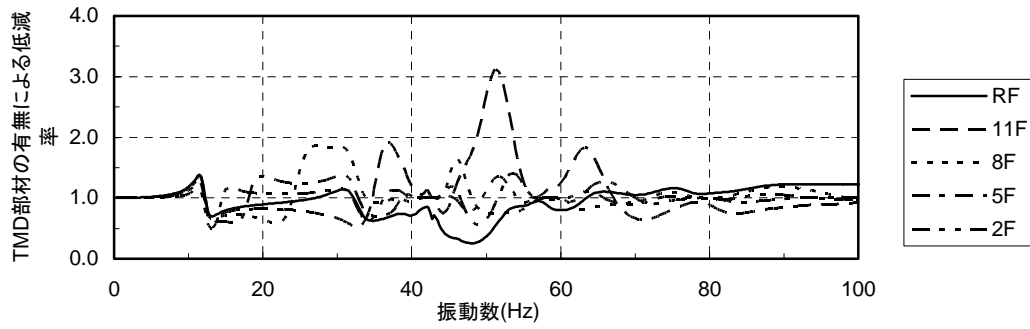
図 5.39 1階に対する各階のスラブ中央の伝達率(CASE IV-1)



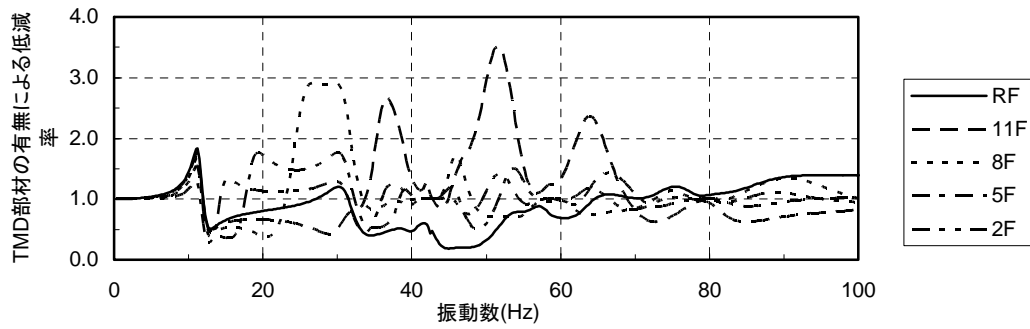
(a)有効質量比0.010



(b)有効質量比0.020



(c)有効質量比0.050



(d)有効質量比0.10

図 5.40 有効質量比の異なる TMD 部材の有無による低減率(CASE IV-1)

## 5.4 結び

本章では、建物の躯体を利用した固体音の低減対策工法の一つとして、スラブの振動を利用した振動低減工法を提案し、低層建物と高層建物に対してこの提案工法を適用した場合の上下振動の振動低減効果について第3章で提案した方法を用いて解析的検討を行った。

低層建物に対しては、TMD部材を各階に設置する場合（CASE I）と、同部材を建物の頂部に設置する場合（CASE II）について解析を行った。CASE IもCASE IIもTMD部材の固有振動数付近で振動低減効果が確認され、TMD部材の質量が大きいほどその効果が大きくなることが分かった。しかし両ケースともTMD部材の固有振動数付近以外の振動数領域で、逆に伝達率が増幅する傾向が確認され、CASE Iでは最大で1.7倍、CASE IIでは最大で2.3倍増幅している。ただし、固有振動数の異なるTMD部材を2基または3基設置したことにより、TMD部材の固有振動数付近における振動低減効果も若干低下するが、その他の振動数領域の増幅も低減されることが分かった。また、CASE IのうちTMD部材を1基設置したケースについて、TMD部材の減衰定数の違いが伝達率に及ぼす影響について検討した。その結果、減衰定数が大きくなるほど伝達率の凹凸が小さくなる傾向が見られた。

以上から、低層建物については固有振動数の異なる複数のTMD部材を適切に配置することにより、固体音の主因である上下振動を低減する可能性があることを解析的に確認した。

高層建物に対しては、低層建物と同様にTMD部材を各階に設置する場合（CASE III）と、同部材を建物の頂部に設置する場合（CASE IV）について解析を行った。CASE IIIではTMD部材の固有振動数付近で、特に高階になるにしたがい振動低減効果が顕著となったが、CASE IVでは顕著な振動低減効果が確認されず、かえって増幅する階があることが分かった。

以上より、高層建物についてはTMD部材を各階に設置した方が建物の頂部に設置するより振動低減効果が高いことが分かった。頂部に設置して振動低減効果が得られるのは、低層建物のように上下方向の1次固有振動数と固体音に関連する振動数が概ね一致する場合であり、高層建物のように上下方向の1次固有振動数が10Hz前後の場合は、効果がほとんど得られない。



## 第6章

### 結論

---

第1章では、はじめに固体音の予測およびその低減対策に関する背景の説明と問題点の指摘を行い、本論文の目的について述べた。既往の研究や現状の問題点を踏まえ、経済的かつ工学的な観点から、固体音の予測のための簡易評価法の構築、および躯体を利用した固体音の低減対策の確立が必要であるとの考えが、本研究の動機となっていることを示した。

次に、関連する既往の研究を固体音の予測とその低減対策に分類してそれぞれ述べた。固体音の予測に関する研究については、固体音を特徴付ける5特性のうち本論文の研究内容との関連性が高い、地盤と建物との相互作用特性および建物内の振動伝搬特性の評価に関する既往の研究と問題点について述べた。一方、固体音の低減対策に関する研究については、加振源対策、地盤における対策、建物基礎・躯体における対策、内装における対策に関する既往の研究についてそれぞれ述べ、建物基礎・躯体における対策のうち、免震構法による振動低減に関する既往の研究についてはやや詳細に述べた。

第2章では、埋込みのない剛基礎を仮定する既往の評価式を応用した、柔基礎の入力損失特性に関する簡易評価法の提案とその適用について述べた。提案する簡易評価法は、基礎板厚が変化することによる基礎剛性の変化や、入力変位の非一様性を考慮することができることを利点とする。はじめに簡易評価法の計算方法について述べ、続いて簡易評価法に対する各種パラメータの影響、実測結果との比較による簡易評価法の検証と考察、および剛基礎を仮定した既往の評価式と簡易評価法による評価結果の差異について論じた。

簡易評価法の妥当性を、4, 13, 20階建ての3棟の建物における上下振動成分の実測結果から計算される伝達率と簡易評価法により計算される伝達率とを比較することにより評価した。剛基礎を仮定した既往の評価式については、実測結果と比較して3棟とも基礎の入力損失を過大に評価する結果となった。しかし、簡易評価法については、地下鉄軌道の直上に建つ4階建て建物に関しては実測結果と整合していないが、他の2棟については一部の高振動数領域を除くと実測結果とよく整合していることが分かった。4階建て建物において実測結果と整合していなかったことの理由は、同建物の基礎への振動の入力機構が不明確であったにも拘らず、水平進行波が到来しているものと仮定して計算したためと思われる。以上より、基礎の入力損失特性を評価するためには、基礎を柔基礎として扱うこと、および基礎に対する入力変位の位相特性を適切に評価することが極めて重要であることが明らかとなった。

第3章では、多質点系モデルを用いた建物内の振動伝搬特性に関する簡易評価法の提案とその適用について述べた。提案する簡易評価法は、固体音領域の振動に対して影響を及ぼすスラブの部材を平板の振動理論に基づいて質点系モデルに置換することにより、建物の構造部材をすべて多質点系モデルとして構築することができ、モデル化に必要な手続きおよび解析時間を大幅に低減することができることを特徴とする。はじめに評価方法の計算フローおよび各段階の計算方法



について述べ、次に簡易評価法の妥当性を評価するために、同法と実測結果から計算される伝達率の比較および考察について論じた。

簡易評価法の妥当性を、4, 8, 14 階建ての 3 棟の建物における上下振動成分の実測結果との比較により評価した。スラブを質点系モデルに置換していない多質点系モデルを用いて計算した伝達率は実測結果との整合性が低い、スラブを質点系モデルに置換した多質点系モデルを用いて計算した伝達率は実測結果との整合性が高いことが分かった。しかし、中層建物および高層建物については高振動数領域において簡易評価法と実測結果との整合性がやや低くなることも明らかとなった。

以上より、スラブを質点系モデルに置換して建物全体を多質点系モデルとして構築することにより、建物内の振動伝搬特性を適切に評価することができることが分かった。ただし、8, 14 階建て建物の高振動数領域において評価精度の低い部分が見られるなど不十分な点も残ることが分かった。この理由としては、高振動数領域では二重床や天井などの種々の仕上げ材の振動が影響しているためと考えられる。

第 4 章では、固体音の低減対策として有効とされる免震構法について、その振動低減効果を解析と実測により明らかにした。はじめに実測データの蓄積を目的として、20 階建て免震集合住宅に対して実施した振動測定の概要および結果について述べ、次に実測した建物を含む、試設計された階数の異なる免震建物の振動解析を実施して、上記実測結果との整合性、および振動低減に寄与する要因について論じた。

既往の研究の中には、免震構法を採用することにより約 20dB の高い振動低減効果が得られている研究がある。しかし、実測した建物では顕著な振動低減効果を確認することができなかった。このことを検証するために、5~20 階建ての免震集合住宅を模擬した多質点系モデルを構築して、免震階（下部基礎）に対する各階の伝達率を計算した。解析パラメータは免震部材の鉛直バネと免震層より上部の建物質量から計算される上下方向の固有振動数（本論文では免震上下振動数と称している）である。計算の結果、建物階数が多いほど、また免震層を含む建物全体の上下方向の固有振動数が高いほど、振動低減効果が低くなることが明らかとなった。また、20 階建てモデルによる解析結果と実測結果の振動低減効果がほぼ一致していることを確認した。以上より、固体音の低減を目的として免震構法を採用する場合、一定の振動低減効果を期待するためには建物階数と免震上下振動数を考慮して免震部材の仕様を決定する必要があることが分かった。ただし、固体音の低減を目的として免震層上下振動数を低下させることは、免震部材のクリープの増大、地震時の上下振動やロッキング振動の卓越など、固体音とは関係のないところで悪影響を及ぼす可能性が高いため、安易に免震上下振動数を低下させることは好ましくないと考える。免震構法を固体音の低減対策として適用する場合には、これらの点に留意する必要がある。

第5章では、スラブの部材をTMDとして利用する新しい固体音の低減対策工法を提案し、低層および高層建物に対してこの対策工法を適用した場合の振動低減効果について述べた。本論文ではこのような部材をTMD部材と称している。

第3章に示した簡易評価法を適用して、TMD部材を各階に配置した場合と建物頂部に集中的に配置した場合の応答比較を行った。その結果、TMD部材を各階に配置した場合は、低層、高層建物ともにTMD部材の固有振動数付近で振動低減効果が顕著となり、TMD部材の質量が大きいほどその効果が大きくなることが分かった。一方、TMD部材を建物頂部に配置した場合は、低層建物については各階に配置した場合と同様の傾向となったが、高層建物についてはほとんど効果がないことが分かった。

以上より、低減させたい振動数に固有振動数を調節したTMD部材を設置することにより、一定の振動低減効果が得られることが分かった。ただし、固体音の主因である上下動を効果的に低減させるためには、TMD部材の質量を大きくし、建物の上下振動特性に応じてTMD部材を適切に配置させることが重要であることが分かった。

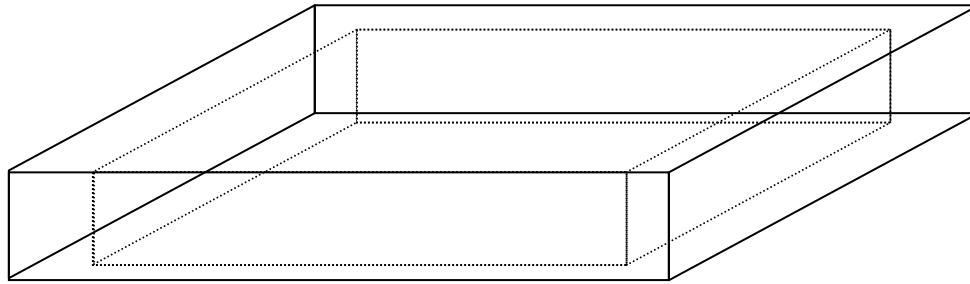
以上のように本論文では、都市の高度化や居住者の多様化が進展する中で、居住性の確保と密接な関係のある固体音に関する問題を取り上げ、その問題の解決を図るために必要な固体音の予測と固体音の低減対策の改善について述べた。第1章で述べたとおり、固体音に関する問題は多岐に亘っており、すべての問題を解決することは困難である。本論文では、固体音の予測については、これまで簡易でありかつ高い精度の予測が困難であった基礎の入力損失と建物内の振動伝搬の各特性を簡易に評価する方法について述べ、その簡易評価法の妥当性を実測結果と比較することにより確認した。また、固体音の低減対策については、対策費用の抑制と建物の使用性を維持する目的から躯体を利用した低減対策に着目して、免震構法を採用した場合とスラブをTMD部材として利用した場合の振動低減効果について述べ、実測結果や解析結果からそれらの構法や部材を適用した場合の振動低減効果を確認した。本論文に示した方法や結果は固体音に関する一部の問題に対する一つの解を与えるものであると考える。

# APPENDIX

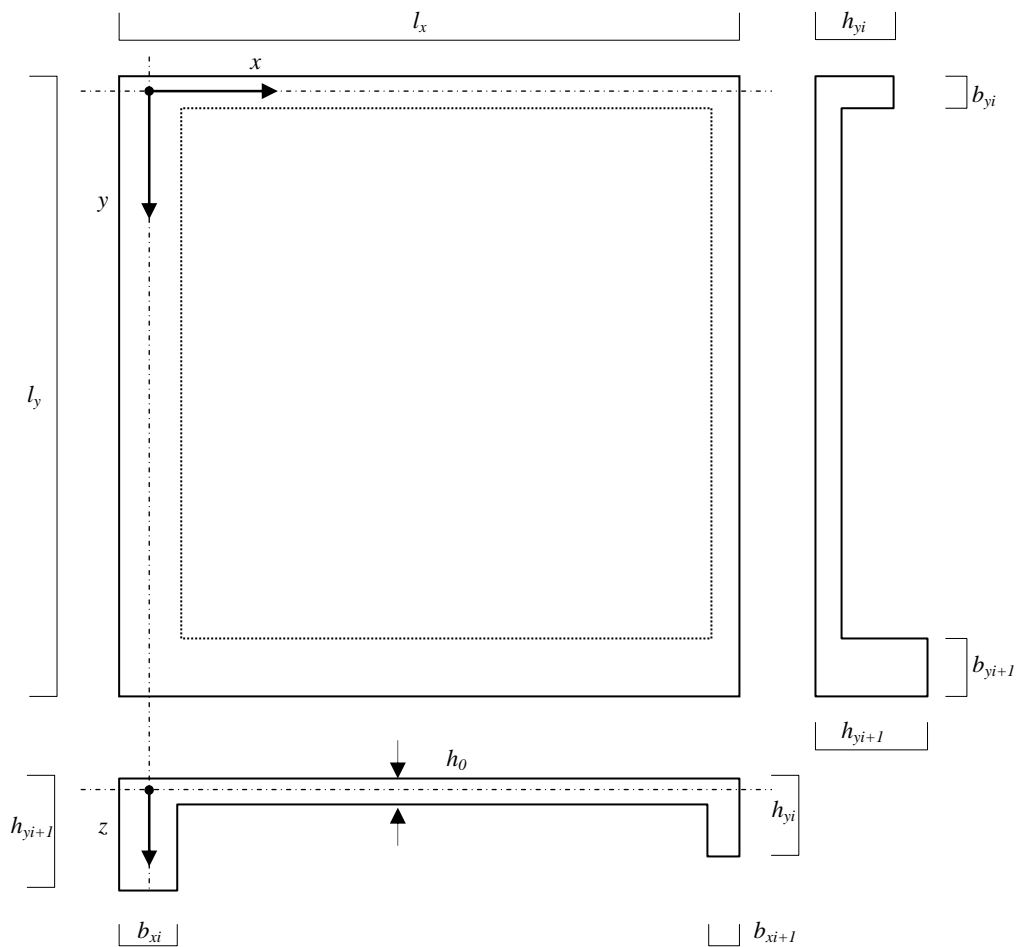
---

### A.1 スラブ振動の支配方程式と固有振動数の算定方法

周辺に境界梁を有するスラブの模式図を図A.1に示す。境界梁の断面形状を矩形とし、 $x$ 方向の境界梁 $j$ の幅を $b_{yj}$ 、高さを $h_{yj}$ 、 $y$ 方向の境界梁 $i$ の幅を $b_{xi}$ 、高さを $h_{xi}$ と表現する。各梁の断面形状は長さ方向に同一であるが、各梁の断面形状は任意である。



(a)矩形スラブの鳥瞰図



(b)矩形スラブの平面図と断面図

図 A.1 境界梁を有する矩形スラブ

スラブの挙動は微小変形する等方等質板の曲げ問題と考える。すなわち、Kirchhoff-Love の仮定が成立するものとする。

平板の変位－ひずみ関係は次式で与えられる。

$$\varepsilon_x = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (\text{A-1})$$

$$\varepsilon_y = -z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (\text{A-2})$$

$$\gamma_{xy} = -2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (\text{A-3})$$

応力－ひずみ関係は次式で与えられる。

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y) = -\frac{Ez}{1-\nu^2} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (\text{A-4})$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x) = -\frac{Ez}{1-\nu^2} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \quad (\text{A-5})$$

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy} = -2Gz \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (\text{A-6})$$

ここに、 $E$  は Young 率、 $G$  はせん断弾性係数、 $\nu$  は Poisson 比、 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  および  $\tau_{xy}$  はそれぞれ、 $x$ 、 $y$  方向の応力と  $xy$  平面のせん断応力、 $\varepsilon_x$  および  $\varepsilon_y$  はそれぞれ  $x$ 、 $y$  方向ひずみ、 $\gamma_{xy}$  はせん断ひずみを表す。

周辺に境界梁を有するスラブの支配方程式を次式に示すような Hamilton の原理から求める。

$$\delta I = \delta \int_{t_1}^{t_2} (T - U - V) dt = 0 \quad (\text{A-7})$$

ここに、 $T$  は運動エネルギー、 $U$  はひずみエネルギー、 $V$  はポテンシャルエネルギー、 $\delta$  は変分記号を表す。

はじめに、ひずみエネルギー  $U$  は次式のように表現される。

$$U = \frac{1}{2} \iiint (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \tau_{xy} \gamma_{xy}) dx dy dz \quad (\text{A-8})$$

式(A-1)～(A-3)を式(A-8)に代入すると次式が得られる。

$$U = -\frac{1}{2} \iiint \left( \sigma_x z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \sigma_y z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2\tau_{xy} z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) dx dy dz \quad (\text{A-9})$$

ここで、 $x, y$  方向の曲げモーメントをそれぞれ、 $M_x, M_y$ 、ねじりモーメントを  $M_{xy}, M_{yx}$  を次式のように定義する。

$$M_x = \int \sigma_x z dz \quad (\text{A-10})$$

$$M_y = \int \sigma_y z dz \quad (\text{A-11})$$

$$M_{xy} = \int \tau_{xy} z dz \quad (\text{A-12})$$

$$M_{yx} = \int \tau_{yx} z dz \quad (\text{A-13})$$

式(A-10)～(A-13)を式(A-9)に代入すると次式となる。

$$U = -\frac{1}{2} \iint \left( M_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + M_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + M_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + M_{yx} \frac{\partial^2 w}{\partial y \partial x} \right) dx dy \quad (\text{A-14})$$

式(A-4)～(A-6)を式(A-10)～(A-13)に代入すると次式が得られる。

$$M_x = -\frac{E}{1-\nu^2} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \left[ \frac{z^3}{3} \right]_{h_{mby}}^{h_{mty}} \quad (\text{A-15})$$

$$M_y = -\frac{E}{1-\nu^2} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \left[ \frac{z^3}{3} \right]_{h_{mbx}}^{h_{mtx}} \quad (\text{A-16})$$

$$M_{xy} = -\frac{E(1-\nu)}{1-\nu^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \left[ \frac{z^3}{3} \right]_{h_{mby}}^{h_{mty}} \quad (\text{A-17})$$

$$M_{yx} = -\frac{E(1-\nu)}{1-\nu^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y \partial x} \left[ \frac{z^3}{3} \right]_{h_{mbx}}^{h_{mtx}} \quad (\text{A-18})$$

ここに、 $h_{mby}$  および  $h_{mty}$  は、 $x$  方向断面のスラブ中立面よりそれぞれスラブ下端、上端までの距離、 $h_{mbx}$  および  $h_{mtx}$  は、 $y$  方向断面のスラブ中立面よりそれぞれスラブ下端、上端までの距離を現す。

ここで、対象とするスラブの厚さ  $h_0$  がスラブ全体で一様であると考えると、 $h_{mby}$ 、 $h_{mty}$ 、 $h_{mbx}$ 、 $h_{mtx}$  はそれぞれ次式のように表現される。

$$h_{mbx} = h_{mby} = \frac{h_0}{2} \quad (\text{A-19})$$

$$h_{mx} = h_{my} = -\frac{h_0}{2} \quad (\text{A-20})$$

したがって、厚さが一様であるスラブの曲げモーメントおよびねじりモーメントは次式のように表現される。

$$M_x = -D_0 \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (\text{A-21})$$

$$M_y = -D_0 \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \quad (\text{A-22})$$

$$M_{xy} = -(1-\nu)D_0 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (\text{A-23})$$

$$M_{xy} = M_{yx} \quad (\text{A-24})$$

ここに、 $D_0$ は平板の曲げ剛性であり、次式で表現される。

$$D_0 = \frac{Eh_0^3}{12(1-\nu^2)} \quad (\text{A-25})$$

以上より、式(A-14)のひずみエネルギー $U$ は次式のように表現される。

$$U = \frac{1}{2} \iint D_0 \left[ \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2(1-\nu) \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dx dy \quad (\text{A-26})$$

一方、ポテンシャルエネルギー $V$ の変分 $\delta V$ は次式のように表現される。

$$\begin{aligned} \delta V = & -\iint (p - c\dot{w})\delta w dx dy - \int_0^{l_y} \left( -m_x \delta \frac{\partial w}{\partial x} - m_{xy} \delta \frac{\partial w}{\partial y} + q_x \delta w \right) dy \Big|_0^{l_x} \\ & - \int_0^{l_x} \left( -m_y \delta \frac{\partial w}{\partial y} - m_{yx} \delta \frac{\partial w}{\partial x} + q_y \delta w \right) dx \Big|_0^{l_y} \end{aligned} \quad (\text{A-27})$$

ここに、 $p$ は外力、 $c$ は減衰係数、 $m_x$ 、 $m_y$ は境界辺で指定された曲げモーメント、 $m_{xy}$ 、 $m_{yx}$ は境界辺で指定されたねじれモーメント、 $q_x$ は境界辺 $x=0$ または $x=l_x$ で指定されるせん断力、 $q_y$ は境界辺 $y=0$ または $y=l_y$ で指定されるせん断力を表す。

運動エネルギー $T$ について、回転慣性を無視すると次式で表現される。

$$T = \frac{1}{2} \iint m_0 (\dot{w})^2 dx dy \quad (\text{A-28})$$

ここに、 $m_0$ は単位面積当たりのスラブの質量を表す。

式(A-7)に式(A-26)～(A-28)を代入すると、次式が得られる。

$$\begin{aligned}
\delta I = & - \int_{t_1}^{t_2} \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \left\{ m_0 \ddot{w} + c \dot{w} + D_0 \left( \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} \right) - p \right\} \delta w dx dy \\
& - \int_0^{l_y} \left[ \left\{ D_0 \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (2-\nu) D_0 \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} + \left( \frac{\partial m_{xy}}{\partial y} + q_x \right) \right\} \delta w \right]_0^{l_x} dy \\
& - \int_0^{l_x} \left[ \left\{ D_0 \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + (2-\nu) D_0 \frac{\partial^3 w}{\partial y \partial x^2} + \left( \frac{\partial m_{yx}}{\partial x} + q_y \right) \right\} \delta w \right]_0^{l_y} dx \\
& + \int_0^{l_y} \left[ \left\{ D_0 \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + m_x \right\} \delta \frac{\partial w}{\partial x} \right]_0^{l_x} dy \\
& + \int_0^{l_x} \left[ \left\{ D_0 \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + m_y \right\} \delta \frac{\partial w}{\partial y} \right]_0^{l_y} dx \\
& + \left\{ 2(1-\nu) D_0 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + 2m_{xy} \right\} \delta w \bigg|_0^{l_x} \bigg|_0^{l_y} dt = 0
\end{aligned} \tag{A-29}$$

式(A-29)より運動方程式は次式で表現される。

$$m_0 \ddot{w} + c \dot{w} + D_0 \left( \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} \right) - p = 0 \tag{A-30}$$

また、境界条件は以下のように表現される。

$x=0$  または  $x=l_x$  のとき、

$$w = \bar{w} \quad \text{または} \quad -D_0 \left[ \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \right] = \nu_x \tag{A-31}$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \quad \text{または} \quad -D_0 \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] = m_x \tag{A-32}$$

$y=0$  または  $y=l_y$  のとき、



$$w = \bar{w} \quad \text{または} \quad -D_0 \left[ \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 w}{\partial y \partial x^2} \right] = \nu_y \quad (\text{A-33})$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \quad \text{または} \quad -D_0 \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] = m_y \quad (\text{A-34})$$

コーナーでは,

$$w = \bar{w} \quad \text{または} \quad -2(1-\nu)D_0 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} = 2m_{xy} \quad (\text{A-35})$$

ここに,  $\nu_x, \nu_y$  は次式で表現される Kirchhoff の換算せん断力である。

$$\nu_x = \frac{\partial m_{xy}}{\partial y} + q_x \quad (\text{A-36})$$

$$\nu_y = \frac{\partial m_{yx}}{\partial x} + q_y \quad (\text{A-37})$$

また,  $\bar{w}, \frac{\partial \bar{w}}{\partial x}, \frac{\partial \bar{w}}{\partial y}$  は境界边上で規定されるたわみ, および回転角である。

せん断力  $q_x, q_y$  および換算せん断力  $\nu_x, \nu_y$  は次式で表現される。

$$q_x = -D_0 \left( \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \right) \quad (\text{A-38})$$

$$q_y = -D_0 \left( \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} + \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} \right) \quad (\text{A-39})$$

$$\nu_x = -D_0 \left\{ \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \right\} \quad (\text{A-40})$$

$$\nu_y = -D_0 \left\{ \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} \right\} \quad (\text{A-41})$$

以上示された各式から, スラブのコーナー部ではたわみが生じないものと仮定すると, スラブが境界梁で支持される場合の境界条件は以下のように表される。なお, 梁の Young 率およびせん断弾性係数は一定とする。

$x=0$  のとき,

$$-D_0 \left[ \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \right] = EI_{bx1} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \quad (\text{A-42})$$

$$-D_0 \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] = GJ_{bx1} \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \quad (\text{A-43})$$

$x=l_x$  のとき,

$$-D_0 \left[ \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \right] = EI_{bx2} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \quad (\text{A-44})$$

$$-D_0 \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] = GJ_{bx2} \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \quad (\text{A-45})$$

$y=0$  のとき,

$$-D_0 \left[ \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 w}{\partial y \partial x^2} \right] = EI_{by1} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \quad (\text{A-46})$$

$$-D_0 \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] = GJ_{by1} \frac{\partial^3 w}{\partial y \partial x^2} \quad (\text{A-47})$$

$y=l_y$  のとき,

$$-D_0 \left[ \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 w}{\partial y \partial x^2} \right] = EI_{by2} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \quad (\text{A-48})$$

$$-D_0 \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] = GJ_{by2} \frac{\partial^3 w}{\partial y \partial x^2} \quad (\text{A-49})$$

コーナーのとき

$$w=0 \quad (\text{A-50})$$

しかし、周辺が梁で支持されたスラブの境界条件は、 $x, y$ の両方向が連成しており、単純支持や固定支持の場合のように境界条件を簡単に満足する形状関数を見つけ出すことは難しい。ここでは形状関数を変数分離形で表現するために、図A.2に示すような境界が鉛直バネおよび回転バネで支持されている場合を考える。

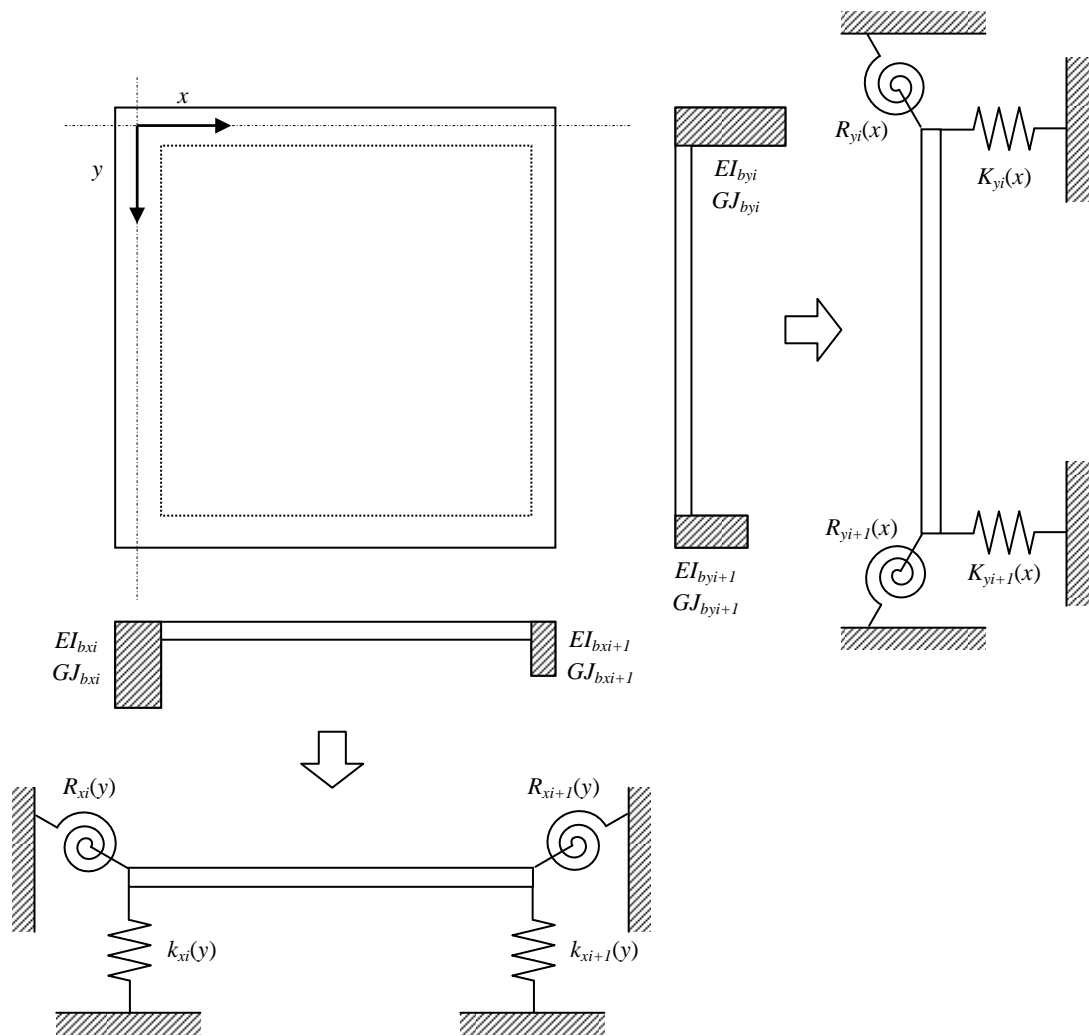


図 A.2 境界梁のバネ置換モデル

このように考えると、式(A-42)~(A-49)は次式のように表現することができる。

$x=0$  のとき、

$$-D_0 \left[ \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \right] = k_{xi}(y)w \quad (\text{A-51})$$

$$-D_0 \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] = -R_{xi}(y) \frac{\partial w}{\partial x} \quad (\text{A-52})$$

$x=l_x$  のとき、

$$-D_0 \left[ \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \right] = -k_{xi+1}(y)w \quad (\text{A-53})$$

$$-D_0 \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] = R_{xi+1}(y) \frac{\partial w}{\partial x} \quad (\text{A-54})$$

$y=0$  のとき,

$$-D_0 \left[ \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 w}{\partial y \partial x^2} \right] = k_{yi}(x) w \quad (\text{A-55})$$

$$-D_0 \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] = -R_{yi}(x) \frac{\partial w}{\partial y} \quad (\text{A-56})$$

$y=l_y$  のとき,

$$-D_0 \left[ \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 w}{\partial y \partial x^2} \right] = -k_{yi+1}(x) w \quad (\text{A-57})$$

$$-D_0 \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] = R_{yi+2}(x) \frac{\partial w}{\partial y} \quad (\text{A-58})$$

ここに,  $k_{xi}, k_{xi+1}, k_{yi}, k_{yi+1}$  は鉛直バネの剛性,  $R_{xi}, R_{xi+1}, R_{yi}, R_{yi+1}$  は回転バネの剛性である。なお, これらの剛性は梁方向に対して変化するものとする。すなわち, 次式のように表現することができる。

$$k_{xi}(y) = k_{xio} + k_{xir} D(y - y_{kir}) \quad (\text{A-59})$$

$$R_{xi}(y) = R_{xio} + R_{xir} D(y - y_{kir}) \quad (\text{A-60})$$

$$k_{xi+1}(y) = k_{xi+1o} + k_{xi+1r} D(y - y_{ki+1r}) \quad (\text{A-61})$$

$$R_{xi+1}(y) = R_{xi+1o} + R_{xi+1r} D(y - y_{ri+1r}) \quad (\text{A-62})$$

$$k_{yi}(x) = k_{yio} + k_{yis} D(x - x_{kis}) \quad (\text{A-63})$$

$$R_{yi}(x) = R_{yio} + R_{yis} D(x - x_{Ris}) \quad (\text{A-64})$$

$$k_{yi+1}(x) = k_{yi+1o} + k_{yi+1s} D(x - x_{ki+1s}) \quad (\text{A-65})$$

$$R_{yi+1}(x) = R_{yi+1o} + R_{yi+1s} D(x - x_{ri+1s}) \quad (\text{A-66})$$

ここに,  $k_{xio}(y)$  は鉛直バネ  $k_{xi}(y)$  の基準剛性,  $k_{xir}(y)$  は  $D(y - y_{kir})$  で規定された区間の鉛直バネの付加剛性,  $R_{xio}(y)$  は回転バネの基準剛性,  $R_{xir}(y)$  は  $D(y - y_{kir})$  で規定された区間の回転バネの付加剛性,  $k_{yio}(x), k_{yis}(x), R_{yio}(x), R_{yis}(x)$  は同様に  $x$  方向に対する各バネ剛性,  $D(y - y_{kir})$  などは規定された区間のみに 1 となる拡張した Dirac 関数である。

ここで, 式(A-42)～(A-49)と式(A-51)～(A-58)が等価であると考えれば, 境界条件は次式で表現される。

$$k_{xi}(y) = EI_{bxi} \frac{\partial^4 w}{w \partial y^4} \quad (\text{A-67})$$

$$R_{xi}(y) = -GJ_{bxi} \frac{1}{\frac{\partial w}{\partial x}} \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \quad (\text{A-68})$$

$$k_{xi+1}(y) = EI_{bxi+1} \frac{\partial^4 w}{w \partial y^4} \quad (\text{A-69})$$

$$R_{xi+1}(y) = -GJ_{bxi+1} \frac{1}{\frac{\partial w}{\partial x}} \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \quad (\text{A-70})$$

$$k_{yi}(x) = EI_{byi} \frac{\partial^4 w}{w \partial x^4} \quad (\text{A-71})$$

$$R_{yi}(x) = -GJ_{byi} \frac{1}{\frac{\partial w}{\partial y}} \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} \quad (\text{A-72})$$

$$k_{yi+1}(x) = EI_{byi+1} \frac{\partial^4 w}{w \partial x^4} \quad (\text{A-73})$$

$$R_{yi+1}(x) = -GJ_{byi+1} \frac{1}{\frac{\partial w}{\partial y}} \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} \quad (\text{A-74})$$

ここで、式(A-42)～(A-49)および式(A-51)～(A-58)は Poisson 比  $\nu$  があることから、 $x, y$  方向ともに連成することになり扱いが難しい。ここでは、工学的見地からスラブのたわみが  $x, y$  方向それぞれの形状関数の積で表現されるものと仮定する。スラブのたわみ  $w$  を近似的に次式のように級数展開する。

$$w(x, y) = \sum_m \sum_n w_{mn} f_m(x) f_n(y) \quad (\text{A-75})$$

式(A-75)を式(A-67)～(A-74)に代入すると次式が得られる。

$$k_{xi}(y) \sum_m \sum_n w_{mn} f_m(x=0) f_n(y) = EI_{bxi} \sum_m \sum_n w_{mn} f_m(x=0) \frac{d^4 f_n(y)}{dy^4} \quad (\text{A-76})$$

$$R_{xi}(y) \sum_m \sum_n w_{mn} \frac{df_m(x=0)}{dx} f_n(y) = -GJ_{bxi} \sum_m \sum_n w_{mn} \frac{df_m(x=0)}{dx} \frac{d^2 f_n(y)}{dy^2} \quad (\text{A-77})$$

$$k_{xi+1}(y) \sum_m \sum_n w_{mn} f_m(x=l_x) f_n(y) = EI_{bxi+1} \sum_m \sum_n w_{mn} f_m(x=l_x) \frac{d^4 f_n(y)}{dy^4} \quad (\text{A-78})$$

$$R_{xi+1}(y) \sum_m \sum_n w_{mn} \frac{df_m(x=l_x)}{dx} f_n(y) = -GJ_{bxi+1} \sum_m \sum_n w_{mn} \frac{df_m(x=l_x)}{dx} \frac{d^2 f_n(y)}{dy^2} \quad (\text{A-79})$$

$$k_{yi}(x) \sum_m \sum_n w_{mn} f_m(x) f_n(y=0) = EI_{byi} \sum_m \sum_n w_{mn} \frac{d^4 f_n(x)}{dy^4} f_n(y=0) \quad (\text{A-80})$$

$$R_{yi}(x) \sum_m \sum_n w_{mn} f_m(x) \frac{df_n(y=0)}{dy} = EI_{byi} \sum_m \sum_n w_{mn} \frac{d^2 f_n(x)}{dx^2} \frac{df_n(y=0)}{dy} \quad (\text{A-81})$$

$$k_{yi+1}(x) \sum_m \sum_n w_{mn} f_m(x) f_n(y=l_y) = EI_{byi+1} \sum_m \sum_n w_{mn} \frac{d^4 f_n(x)}{dy^4} f_n(y=l_y) \quad (\text{A-82})$$

$$R_{yi+1}(x) \sum_m \sum_n w_{mn} f_m(x) \frac{df_n(y=l_y)}{dy} = EI_{byi+1} \sum_m \sum_n w_{mn} \frac{d^2 f_n(x)}{dx^2} \frac{df_n(y=l_y)}{dy} \quad (\text{A-83})$$

ここで、 $\bar{k}_{xi}$ ,  $\bar{k}_{xi+1}$ ,  $\bar{k}_{yi}$ ,  $\bar{k}_{yi+1}$ ,  $\bar{R}_{xi}$ ,  $\bar{R}_{xi+1}$ ,  $\bar{R}_{yi}$ ,  $\bar{R}_{yi+1}$  を平均的なバネ定数とすると、式(A-76)～(A-83)は次式となる。

$$\bar{k}_{xi} \sum_m \sum_n w_{mn} f_m(x=0) \int_0^{l_y} f_n(y) f_{\bar{n}}(y) dy = EI_{bxi} \sum_m \sum_n w_{mn} f_m(x=0) \int_0^{l_y} \frac{d^4 f_n(y)}{dy^4} f_{\bar{n}}(y) dy \quad (\text{A-84})$$

$$\bar{R}_{xi} \sum_m \sum_n w_{mn} \frac{df_m(x=0)}{dx} \int_0^{l_y} f_n(y) f_{\bar{n}}(y) dy = -GJ_{bxi} \sum_m \sum_n w_{mn} \frac{df_m(x=0)}{dx} \int_0^{l_y} \frac{d^2 f_n(y)}{dy^2} f_{\bar{n}}(y) dy \quad (\text{A-85})$$

$$\bar{k}_{xi+1} \sum_m \sum_n w_{mn} f_m(x=l_x) \int_0^{l_y} f_n(y) f_{\bar{n}}(y) dy = EI_{bxi+1} \sum_m \sum_n w_{mn} f_m(x=l_x) \int_0^{l_y} \frac{d^4 f_n(y)}{dy^4} f_{\bar{n}}(y) dy \quad (\text{A-86})$$

$$\bar{R}_{xi+1} \sum_m \sum_n w_{mn} \frac{df_m(x=l_x)}{dx} \int_0^{l_y} f_n(y) f_{\bar{n}}(y) dy = -GJ_{bxi+1} \sum_m \sum_n w_{mn} \frac{df_m(x=l_x)}{dx} \int_0^{l_y} \frac{d^2 f_n(y)}{dy^2} f_{\bar{n}}(y) dy \quad (\text{A-87})$$

$$\bar{k}_{yi} \sum_m \sum_n w_{mn} f_n(y=0) \int_0^{l_x} f_m(x) f_{\bar{m}}(x) dx = EI_{byi} \sum_m \sum_n w_{mn} f_n(y=0) \int_0^{l_x} \frac{d^4 f_m(x)}{dy^4} f_{\bar{m}}(x) dx \quad (\text{A-88})$$

$$\bar{R}_{yi} \sum_m \sum_n w_{mn} \frac{df_n(y=0)}{dy} \int_0^{l_x} f_m(x) f_{\bar{m}}(x) dx = EI_{byi} \sum_m \sum_n w_{mn} \frac{df_n(y=0)}{dy} \int_0^{l_x} \frac{d^2 f_m(x)}{dx^2} f_{\bar{m}}(x) dx \quad (\text{A-89})$$

$$\bar{k}_{yi+1} \sum_m \sum_n w_{mn} f_n(y=l_y) \int_0^{l_x} f_m(x) f_{\bar{m}}(x) dx = EI_{byi+1} \sum_m \sum_n w_{mn} f_n(y=l_y) \int_0^{l_x} \frac{d^4 f_m(x)}{dy^4} f_{\bar{m}}(x) dx \quad (\text{A-90})$$

$$\bar{R}_{yi+1} \sum_m \sum_n w_{mn} \frac{df_n(y=l_y)}{dy} \int_0^{l_x} f_m(x) f_{\bar{m}}(x) dx = EI_{byi+1} \sum_m \sum_n w_{mn} \frac{df_n(y=l_y)}{dy} \int_0^{l_x} \frac{d^2 f_m(x)}{dx^2} f_{\bar{m}}(x) dx \quad (\text{A-91})$$

スラブ解析に用いる平板の形状関数は梁の形状関数を使用する。しかし、梁の形状関数では、鉛直および回転の各バネは平板の境界梁の効果を入れた形で表現することができない。そこで、以下のような便法を考える。

近似的なバネ定数を初期値とする。

①のバネ定数に対応した梁の形状関数を算定する。この梁の形状関数をスラブの形状関数とする。

Galerkin 式を解き、スラブのたわみ、および固有振動数を算定する。

③で計算した形状関数を用いて、式(A-84)～(A-91)によりバネ定数を計算する。

Galerkin 式を解き、スラブのたわみ、および固有振動数を算定する。以降、たわみまたは固有振動数が収束するまで、④⑤の計算を実行する。

## A.2 梁の形状関数

図A.3に示すようなバネ支持された梁を考える。梁の断面形状およびYoung率は一様と仮定する。このような弾性梁の自由振動の方程式は次式で表現される。なお、ここでは減衰を無視する。



図 A.3 バネ支持された境界梁モデル

$$m\ddot{w} + EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = 0 \quad (\text{A-92})$$

また、境界条件式は次式となる。

$x=0$  のとき、

$$w = -\frac{EI}{k_A} \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \quad (\text{A-93})$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{EI}{R_B} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (\text{A-94})$$

$x=l$  のとき、

$$w = \frac{EI}{k_B} \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \quad (\text{A-95})$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} = -\frac{EI}{R_B} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (\text{A-96})$$

自由振動の変位を次式で表す。

$$w(x, t) = \bar{w}(x)e^{i\alpha t} \quad (\text{A-97})$$

式(A-97)を式(A-92)に代入すると以下の方程式が得られる。



$$EI \frac{\partial^4 \bar{w}}{\partial x^4} - \omega^2 m \bar{w} = 0 \quad (\text{A-98})$$

$k^2 = \omega \sqrt{\frac{m}{EI}}$  とおくと，式(A-98)は次式となる。

$$\frac{\partial^4 \bar{w}}{\partial x^4} - k^4 \bar{w} = 0 \quad (\text{A-99})$$

式(A-99)の同次解は次式となる。

$$\begin{aligned} \bar{w}(x) = & C_1 \{\cos(kx) + \cosh(kx)\} + C_2 \{\cos(kx) - \cosh(kx)\} \\ & + C_3 \{\sin(kx) + \sinh(kx)\} + C_4 \{\sin(kx) - \sinh(kx)\} \end{aligned} \quad (\text{A-100})$$

ここに， $C_1 \sim C_4$ は境界条件に依存する任意定数。

境界条件式(A-93)～(A-96)に式(A-97)を代入すると次式が得られる。

$x=0$  のとき，

$$\bar{w} = -\frac{EI}{k_A} \frac{\partial^3 \bar{w}}{\partial x^3} \quad (\text{A-101})$$

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial x} = \frac{EI}{R_B} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} \quad (\text{A-102})$$

$x=l$  のとき，

$$\bar{w} = \frac{EI}{k_B} \frac{\partial^3 \bar{w}}{\partial x^3} \quad (\text{A-103})$$

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial x} = -\frac{EI}{R_B} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} \quad (\text{A-104})$$

ここで，

$$\frac{k_A}{EI} = \alpha_A \quad (\text{A-105})$$

$$\frac{k_B}{EI} = \alpha_B \quad (\text{A-106})$$

$$\frac{R_A}{EI} = \beta_A \quad (\text{A-107})$$

$$\frac{R_B}{EI} = \beta_B \quad (\text{A-108})$$

のように置くと、式(A-101)～(A-104)は次式のように変形される。

$$\alpha_A \bar{k}_{a1} \bar{w}(0) + \bar{k}_{a2} \frac{\partial^3 \bar{w}(0)}{\partial x^3} = 0 \quad (\text{A-109})$$

$$\alpha_B \bar{k}_{b1} \bar{w}(l) - \bar{k}_{b2} \frac{\partial^3 \bar{w}(l)}{\partial x^3} = 0 \quad (\text{A-110})$$

$$\beta_A \bar{R}_{a1} \frac{\partial \bar{w}(0)}{\partial x} - \bar{R}_{a2} \frac{\partial^2 \bar{w}(0)}{\partial x^2} = 0 \quad (\text{A-111})$$

$$\beta_B \bar{R}_{b1} \frac{\partial \bar{w}(l)}{\partial x} + \bar{R}_{b2} \frac{\partial^2 \bar{w}(l)}{\partial x^2} = 0 \quad (\text{A-112})$$

ここに、 $\bar{k}_{a1}$ ,  $\bar{k}_{a2}$ ,  $\dots$ ,  $\bar{R}_{a1}$ ,  $\bar{R}_{a2}$ ,  $\dots$ は境界条件によって決まる定数である。弾性支持の場合はすべて1の値をとる。

さらに、 $\alpha_A$ ,  $\alpha_B$ ,  $\beta_A$ ,  $\beta_B$  を次式のように無次元化する。

$$l^3 \alpha_A = \hat{\alpha}_A \quad (\text{A-113})$$

$$l^3 \alpha_B = \hat{\alpha}_B \quad (\text{A-114})$$

$$l \beta_A = \hat{\beta}_A \quad (\text{A-115})$$

$$l \beta_B = \hat{\beta}_B \quad (\text{A-116})$$

式(A-100)を式(A-109)～(A-112)に代入すると以下の連立方程式が得られる。

$$\begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ 0 & A_{32} & A_{33} & 0 \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{bmatrix} = 0 \quad (\text{A-117})$$

ここに、

$$A_{11} = \hat{\alpha}_A \bar{k}_{a1} \quad (\text{A-118})$$

$$A_{14} = -\bar{k}_{a2} (kl)^3 \quad (\text{A-119})$$

$$A_{21} = \hat{\alpha}_B \bar{k}_{b1} \{\cos(kl) + \cosh(kl)\} - \bar{k}_{b2} (kl)^3 \{\sin(kl) + \sinh(kl)\} \quad (\text{A-120})$$

$$A_{22} = \hat{\alpha}_B \bar{k}_{b1} \{\cos(kl) - \cosh(kl)\} - \bar{k}_{b2} (kl)^3 \{\sin(kl) - \sinh(kl)\} \quad (\text{A-121})$$

$$A_{23} = \hat{\alpha}_B \bar{k}_{b1} \{\sin(kl) + \sinh(kl)\} - \bar{k}_{b2} (kl)^3 \{-\cos(kl) + \cosh(kl)\} \quad (\text{A-122})$$

$$A_{24} = \hat{\alpha}_B \bar{k}_{b1} \{\sin(kl) - \sinh(kl)\} + \bar{k}_{b2} (kl)^3 \{\cos(kl) + \cosh(kl)\} \quad (\text{A-123})$$

$$A_{32} = \bar{R}_{a2} (kl)^2 \quad (\text{A-124})$$

$$A_{33} = \hat{\beta}_A \bar{R}_{a1} (kl) \quad (\text{A-125})$$

$$A_{41} = \hat{\beta}_B \bar{R}_{b1} (kl) \{-\sin(kl) + \sinh(kl)\} + \bar{R}_{b2} (kl)^2 \{-\cos(kl) + \cosh(kl)\} \quad (\text{A-126})$$

$$A_{42} = -\hat{\beta}_B \bar{R}_{b1}(kl) \{\sin(kl) + \sinh(kl)\} - \bar{R}_{b2}(kl) \{\cos(kl) + \cosh(kl)\} \quad (\text{A-127})$$

$$A_{43} = \hat{\beta}_B \bar{R}_{b1}(kl) \{\cos(kl) + \cosh(kl)\} + \bar{R}_{b2}(kl)^2 \{-\sin(kl) + \sinh(kl)\} \quad (\text{A-128})$$

$$A_{44} = \hat{\beta}_B \bar{R}_{b1}(kl) \{\cos(kl) - \cosh(kl)\} - \bar{R}_{b2}(kl)^2 \{\sin(kl) + \sinh(kl)\} \quad (\text{A-129})$$

$C_1 \sim C_4$  が 0 以外の解を持つためには、式(A-117)の行列の次式に示す行列式が 0 となる必要がある。

$$\begin{aligned} & A_{11} A_{32} (A_{24} A_{43} - A_{23} A_{44}) + A_{11} A_{33} (A_{22} A_{44} - A_{24} A_{42}) \\ & + A_{32} A_{14} (A_{23} A_{41} - A_{21} A_{43}) + A_{33} A_{14} (A_{21} A_{42} - A_{21} A_{41}) = 0 \end{aligned} \quad (\text{A-130})$$

式(A-130)より  $kl$  が計算される。なお、この計算は収束演算が必要である。

以上より、式(A-130)における  $C_1 \sim C_4$  同士の比率が求まることから、形状関数式(A-100)が決定される。



## 謝辞

早稲田大学創造理工学部建築学科曾田五月也教授には、著者が早稲田大学、同大学院に在席する間に、本研究の基礎をなす建築振動論、実験方法等につき卒業論文および修士論文の作成を通じてご指導、ご鞭撻を賜り、また本論文のまとめに際し、懇切丁寧なご指導、ご助言を賜りました。ここに深く謝意を表する次第です。また、本論文の審査に際し適切なご指導、ご助言を賜りました早稲田大学創造理工学部建築学科西谷章教授、同山田眞教授、同前田寿朗教授に対しまして深く謝意を表する次第です。

福井工業大学建設工学科野路利幸教授のご助言が端緒となり本研究が始まり、後に名古屋大学澤田義博名誉教授との共同研究を通じて本研究を深化させることができました。両先生方には基礎理論から実験・論文作成に至るまで、公私にわたり終始懇切丁寧なご指導、ご鞭撻を賜り、さらには励ましのお言葉を賜りました。ここに深く感謝申し上げる次第です。

また、金沢工業大学環境・建築学部建築学科高島秀雄教授には平成6年から2年間、計算工学研究会（現：日本計算工学会）の研究分科会を通じて、スラブの解析について懇切丁寧にご指導を頂きました。このときの成果は本研究に不可欠であり、固体音領域における振動予測における強力なツールとなりました。さらには本研究を遂行するに当たり、懇切丁寧なご指導、ご鞭撻を賜りました。ここに深く感謝申し上げる次第です。

著者の所属する三井住友建設株式会社においては、技術開発センター（当時、技術研究所建築研究開発部部長）山中久幸氏、技術開発本部技術管理部副部長谷垣正治氏には、貴重なご指導、ご意見を賜っただけでなく、本研究を遂行する上でこの上ない活動環境を整備して頂きました。また、本研究開始当時に技術研究所所長であった遠藤克彦氏、続いて技術開発本部本部長兼技術開発センター長（当時、技術研究所所長）に着任された黒崎幸夫氏にも研究環境を整備して頂くとともに、著者らの研究活動を温かく見守って頂きました。著者の転属後もエンジニアリング本部本部長能森雅己氏、エンジニアリング企画部部長関口昇氏の多大なるご理解とご協力を得ることができ、本研究を滞りなく遂行することができました。さらに、技術開発本部技術企画部岩本毅氏、および同本部技術開発センター原田浩之氏は、研究初期から著者の共同研究者であり、終始賜った適切かつ貴重なご意見、ご協力は本研究を遂行する上で必要不可欠でした。ここに深く感謝する次第です。

さらに、本研究を進めるにあたり、以下の方々のご協力を賜りました。まず、技術開発センター住環境グループ長赤尾伸一氏には初期の勉強会や技術研究所報の査読、編纂を通じて様々なご指導や技術情報のご提供を賜りました。同センター耐震振動グループ平田裕一氏には、現象の考え方から定式化に至るまで、本研究の中心に関わる部分につきご指導、ご助言を賜りました。平田裕一氏との議論は本研究の礎をなすといっても過言ではありません。同センター建築構造グループ長小坂英之氏には、初期の勉強会から貴重な実験データ・資料のご提供やご指導を賜りまし

た。

また、本研究では提案する評価方法の妥当性を確認するために、多くの振動測定を実施する必要がありました。これらの振動測定を実施するにあたり、東北支店三浦照夫氏、東京建築支店當内優氏、同西関正明氏には、多忙にも拘らず著者らの研究に対する理解と、必要な振動測定の機会と場所の提供を賜り、所定の振動測定を安全無事に実施することができました。また、これらの振動測定の実施にあたり、技術開発センター住環境グループ嶋田泰氏、株式会社カワシマ計測工業橋本隆氏の大なるご協力のもと、良好な測定結果を得ることができました。ここに、心より謝意を表する次第です。

また、2003年から実施した名古屋大学との共同研究において、本研究に関する事項、地盤構造調査および地盤の動特性に関する研究を共同で実施してきた当時名古屋大学工学部助手であった南雲秀樹氏、および同大学院生であった大橋哲朗氏、徳川孝信氏には、振動測定にご協力を賜りました。また、大橋哲朗氏、徳川孝信氏が解析された有限要素法による分析結果は、振動測定結果の不足部分を補うだけでなく、測定結果の解釈にとっても有益でした。ここに、心より謝意を表する次第です。

また、本研究を遂行するにあたり、工学院大学工学部建築学科久田嘉章教授がインターネット上で公開しているプログラムを使用させていただきました。久田嘉章教授には、著者が学生のと  
きから有益なご指導、ご助言を賜りました。ここに深く謝意を表する次第です。

最後になりますが、研究活動を不自由なく進めることができたのは妻：香子をはじめとする家族一同（父：正雄，母：トシ，義父：昭三，義母：しづ，長女：梨紗子，次女：敬子，三女：怜子）の協力と支えと励ましのお陰です。心より御礼申し上げます。

2009年2月  
山岸 邦彰

発表論文・口頭発表一覧

| 種類別 | 題名  | 発表・発行<br>年 月 | 発表・発行<br>掲載誌名             | 著者                                |
|-----|---|--------------|---------------------------|-----------------------------------|
| 論文  | 多質点系モデルによる固体音領域の建物内振動伝搬特性の評価                        | 2008/09      | 日本建築学会環境系論文集, 第73巻, 第631号 | 山岸邦彰, 野路利幸, 岩本毅, 原田浩之             |
| 論文  | 鉄道軌道に近接する免震建築物の振動伝搬特性                               | 2008/08      | 日本建築学会環境系論文集, 第73巻, 第630号 | 山岸邦彰, 野路利幸, 岩本毅, 原田浩之             |
| 論文  | 鉄道振動を受ける基礎の入力損失の実測と簡易評価法の提案                         | 2008/08      | 日本建築学会環境系論文集, 第73巻, 第630号 | 山岸邦彰, 野路利幸, 岩本毅, 原田浩之             |
| 報告  | 地下鉄振動の建物内振動伝搬と基礎の入力損失に関する研究                         | 2007/09      | 三井住友建設技術研究所報告, 第5号        | 山岸邦彰, 谷垣正治, 岩本毅, 原田浩之             |
| 講演  | 実測による地下鉄振動の建物内振動伝搬特性に関する研究(その3) 同一軌道近傍に建つ2建物の振動測定結果 | 2007/08      | 日本建築学会大会学術講演梗概集           | 原田浩之, 野路利幸, 谷垣正治, 岩本毅, 山岸邦彰       |
| 講演  | 地下鉄振動を受ける基礎の入力損失の簡易評価法                              | 2007/08      | 日本建築学会大会学術講演梗概集           | 山岸邦彰, 野路利幸, 谷垣正治, 岩本毅, 原田浩之       |
| 総説  | 防振シートを用いた防振工法による地下鉄固体音の低減対策建物における伝搬特性               | 2007/06      | 音響技術, No.138              | 岩本毅, 山岸邦彰, 池原誠一                   |
| 講演  | 実測による地下鉄振動の建物内振動伝搬特性に関する研究 その2 直接基礎を有する壁式構造の評価結果    | 2006/09      | 日本建築学会大会学術講演梗概集           | 山岸邦彰, 澤田義博, 野路利幸, 岩本毅, 谷垣正治, 原田浩之 |
| 報告  | 地下鉄振動を受ける壁式構造の建物内振動伝搬特性に関する研究                       | 2006/09      | 三井住友建設技術研究所報告, 第4号        | 山岸邦彰, 谷垣正治, 岩本毅, 原田浩之             |
| 講演  | 実測による地下鉄振動の建物内振動伝搬特性に関する研究                          | 2005/09      | 日本建築学会大会学術講演梗概集           | 山岸邦彰, 澤田義博, 野路利幸, 谷垣正治, 岩本毅, 原田浩之 |
| 報告  | 地下鉄振動の地盤・建物内振動伝搬特性に関する研究                            | 2005/09      | 三井住友建設技術研究所報告, 第3号        | 山岸邦彰, 谷垣正治, 岩本毅, 原田浩之             |
| 講演  | 地下鉄走行に伴う振動の地盤・構造物への伝達特性について                         | 2005/05      | 物理探査学会第112回学術講演会論文集       | 澤田義博, 大橋哲朗, 山岸邦彰, 野路利幸            |
| 講演  | 鉄道軌道に近接する免震建築物の振動伝搬特性                               | 2004/11      | 三井住友建設技術研究所報告, 第2号        | 山岸邦彰, 岩本毅, 谷垣正治, 原田浩之, 嶋田泰        |
| 講演  | 鉄道軌道に近接する免震建築物の振動伝搬特性 その1 地盤における振動伝搬特性              | 2004/08      | 日本建築学会大会学術講演梗概集           | 山岸邦彰, 野路利幸, 山中久幸, 岩本毅, 原田浩之, 嶋田泰  |

| 種別 | 題名  | 発表・発行<br>年 月 | 発表・発行<br>掲載誌名       | 著者  |
|----|---|--------------|---------------------|---|
| 講演 | 鉄道軌道に近接する免震建物の振動<br>伝搬特性 その2 基礎の入力損失と<br>免震層の振動伝搬特性 | 2004/08      | 日本建築学会大会学術講<br>演梗概集 | 岩本毅, 野路利幸, 有松重雄,<br>赤尾伸一, 原田浩之, 山岸邦<br>彰  |
| 講演 | 鉄道軌道に近接する免震建物の振動<br>伝搬特性 その3 建物高さ方向の振<br>動伝搬特性      | 2004/08      | 日本建築学会大会学術講<br>演梗概集 | 谷垣正治, 野路利幸, 岩本毅,<br>原田浩之, 嶋田泰, 山岸邦彰       |
| 講演 | 鉄道軌道に近接する免震建物の振動<br>伝搬特性 その4 免震建物の上下動<br>低減効果の解析的検討 | 2004/08      | 日本建築学会大会学術講<br>演梗概集 | 野路利幸, 谷垣正治, 小坂英<br>之, 岩本毅, 原田浩之, 山岸邦<br>彰 |